

令和5年度 修士学位論文

# 車両走行軌跡を用いた交差点 でのドライバ旋回行動モデル に関する研究

指導教員 早川 聡一郎 准教授

三重大学大学院

工学研究科機械工学専攻

人間支援システム研究室

後藤 倫太郎

## 目次

第1章 序論 .....	3
1.1 研究背景 .....	3
1.2 研究目的 .....	6
1.3 本論文の構成 .....	6
第2章 ドライバ旋回行動モデル概要 .....	7
2.1 任意形状の交差点に対応可能なドライバ旋回行動モデル .....	7
2.2 斜交座標系 .....	11
2.3 ドライバ旋回行動モデルから目標走行軌跡の導出 .....	12
第3章 実験装置と実験環境 .....	14
3.1 ドライビングシミュレータの概要 .....	14
3.2 実験環境 .....	16
3.2.1 走行コース1 .....	16
3.2.2 走行コース2 .....	18
3.2.3 走行コース3 .....	19
3.2.4 走行コース4 .....	22
3.2.5 走行コース5 .....	23
第4章 ドライバ旋回行動モデルの構築とモデルの有効性検証 .....	26
4.1 走行データ収集実験 .....	26
4.1.1 実験方法 .....	26
4.1.2 走行データ収集実験結果 .....	30
4.2 ドライバ旋回行動モデルの構築 .....	36
4.3 ドライバ旋回行動モデルの旋回軌道誤差評価 .....	40
4.3.1 モデルの有効性検証 .....	40
4.3.2 追加二名のドライバ走行データとの旋回軌道比較 .....	44
4.3.3 ドライバ個別モデルの作成と評価 .....	48
第5章 結論 .....	53
5.1 本研究のまとめ .....	53
5.2 今後の課題 .....	54
参考文献 .....	55
謝辞 .....	57

# 第 1 章

## 序 論

### 1.1 研究背景

近年、自動車業界を取り巻く環境は大きく変化しており、100年に一度の大変革の時代という言葉をよく耳にするようになった。電動化、コネクテッド、シェアリング、など中でも注目度が高いのが自動化つまり自動運転システムについてであり、実用化も進展している。また、運転支援システムにも目を向けると、代表的なものとして、アダプティブクルーズコントロール<sup>[1]</sup>や車線維持支援システム<sup>[2]</sup>などの運転支援システム ADAS<sup>[3]</sup>があり、現在多くの車両に搭載されている。なかには搭載が義務化されているシステムもある。実際、図 1.1 にも示したように、これらの運転支援技術の進歩もあり交通事故件数及び負傷者数死者数の推移は政府統計によると減少傾向にあり過去最少レベルとなっている。しかし、令和 5 年の死亡事故数 2678 件となっており前年よりも増加していることが分かる<sup>[4]</sup>。このようなことから、更なる技術やシステムの進歩が求められる。そうした中で、自動運転システムには人為的なヒューマンエラーが大半の原因となる交通事故の削減、交通安全性の向上だけでなく、効率的な速度や経路選択、車両同士が連携した渋滞緩和など交通流をスムーズにし、通勤時間や車両のエネルギー消費削減など交通効率の向上などについても期待される。このように、自動運転技術は安全性、効率性、利便性の向上を通じ、交通システム全体の改善をリードする存在となることが期待される。実用化の事例に目を向けると、欧米では Mercedes 社が 2023 年に米国で自動運転レベル 3 の条件付き自動運転向け DRIVE PILOT システムがカリフォルニア州当局から認証を取得したと発表した。実際、DRIVE PILOT システムは 2022 年からドイツで一部車種にて利用可能となっており、さらに 2024 年モデルのメルセデス・ベンツ S クラスなど一部車種を対象にオプションとして米国市場でも利用可能としている。さらに、将来的にはこのシステムの利用可能地域を米国でさらに拡大していく方針を示している<sup>[5]</sup>。図 1.2 にて DRIVE PILOT 搭載車を示している。また、Google 傘下の米企業である、Waymo は、米カリフォルニア州にて 2022 年からサンフランシスコ市を含む複数都市で配車サービス実証事業を開始しており、2023 年には配車サービス大手のウーバーのプラットフォームを通じアリゾナ州フェニックスにて自動運転による配車と料理の宅配サービスを開始すると発表した<sup>[6]</sup>。図 1.3 にて実

際に使用されている車両の例を示す。このように、欧米を中心に自動運転車両の実用化が進展しており、今後は、人間が運転する一般車両と自動運転車両とが同じ道路環境を走行する機会が増加することが予想される。このように両者が混在する道路で、人間の運転行動と異なる運転を行なう車両が存在すると、乗員だけでなく、周囲のドライバにとっても予想外の運転行動となるため、場合によっては事故の原因となる危険性がある。そのため、人間のような運転が行える自動運転車両が必要となる。また、自動運転システムによる走行がドライバにとって不自然であり不快感を与えるものであると、ドライバがシステムを利用せず、結果として安全性の向上などにつながらないことが想定される。このような点からも、人間の運転特性を再現可能な自動運転車両が必要と考えられる。これまでに、減速行動や車線変更、旋回行動などについての運転支援技術やそれに関連する研究は多数行われている<sup>[7]-[19]</sup>。その中で、重要な運転行動のひとつである旋回行動については、ナビゲーション等で広く用いられている道路のノードとリンクで構成される直線的な簡易地図情報と車両位置姿勢情報に基づいて操舵角を制御することで交差点をより滑らかな操舵で走行する手法<sup>[20]</sup>を用いるものや、旋回出口座標と出口方向角など旋回軌道上の目標旋回出口条件を設定し、任意の目標地点を通過する目標軌道生成と車両制御を行う<sup>[21]</sup>ものなどが報告されている。しかし、それらの多くがクロソイド曲線を用いるなど幾何学的な走行軌道生成手法に基づいており、人間の運転特性を考慮した旋回走行モデルに関する報告は少ない。本研究室ではこれまで、ドライバの視覚による周囲の外部環境情報を入力としステアリング操作角度を出力とするハイブリッドシステム表現を利用したドライバモデルを用いて、人間の様々な運転行動のモデル化を行ってきた<sup>[22]-[27]</sup>。しかし、重要な運転行動のひとつである交差点での旋回行動については有効なドライバモデルが構築できていない。小嶋らは、ドライバ使用の外部環境情報に基づき、新たにフィードバック構造を導入したドライバ旋回操作モデルを提案し、旋回軌跡、ステアリング操作、車両挙動についてドライバと一定の類似性を確認した<sup>[26]</sup>が、提案モデルには速度項が含まれており自車速度を固定する必要がある点、交差角度や形状の異なる交差点への適応が不可であることや試行錯誤的なパラメータ選定が必要であることなどの問題を有していた。

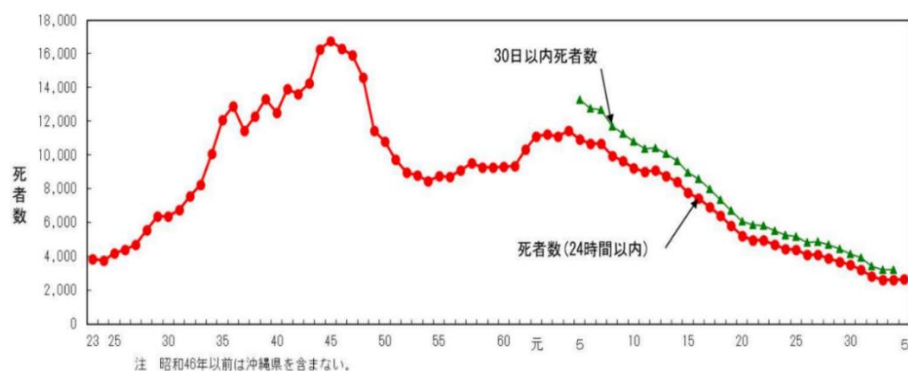


Fig.1.1 交通事故死者数の推移(～2023 年)



Fig.1.2 Mercedes-Benz DRIVE PILOT 搭載車 (Mercedes official )



Fig.1.3 Waymo ドライバー (Waymo official)

## 1.2 研究目的

前節で述べたように，本研究では，ドライバの視覚による外部環境情報を入力とし，ステアリング操作角度を出力とするハイブリッドシステム表現を用いたドライバモデルを提案してきた．しかし，旋回区間におけるステアリング操作について視線計測を用いたモード分割方法に課題があり，形状の異なる交差点への適応不可であったことや旋回時にドライバが使用しているであろうパラメータを試行錯誤的に選定することが必要となる点などの問題を有していた．それらの問題に対して，西川らは実データであるドライバの車両走行軌跡に基づいたドライバ旋回行動モデルを提案した<sup>[28]</sup>．しかし，モデル構築に車体の進行方向でなく車体の向きを用いていたことで一部の旋回パターンにおいて走行軌道生成に課題を残し，十分にモデルの有効性を示すことができなかった．さらに，限定された交差点形状や，ドライバー名の走行データのみを対象とした検証にとどまっていた．そこで本研究では，複数のドライバを対象とし，任意形状の交差点におけるドライバの旋回行動特性を単一モデルで高精度に表現できるかどうかを検証し，提案されてきた本ドライバ旋回行動モデルの有効性を示すことを目的とした．

## 1.3 本論文の構成

本論文の以下の構成を以下に示す．まず，第2章では本研究で使用するドライバ旋回行動モデルの概要と，モデルから目標走行軌跡を導出する方法について説明する．第3章では本研究室で使用したドライビングシミュレータの構成と実験環境に関して説明する．第4章では複数の様々な形状の交差点を含む走行コースでの右折旋回行動を対象とし，複数名を対象とした実験で収集した走行データからドライバ旋回行動モデルを構築する．そして，実験で収集した走行データと比較評価することで，複数のドライバを対象とし，任意形状の交差点におけるドライバの旋回行動特性を単一モデルで高精度に表現できるかどうかを検証し，提案されてきた本ドライバ旋回行動モデルの有効性を検証する．第5章では本論文のまとめと今後の課題について述べる．

## 第 2 章

# ドライバ旋回行動モデル概要

### 2.1 任意形状の交差点に対応可能なドライバ旋回行動モデル

前述した通り、本研究における従来研究では、ドライバの視覚情報など周囲の外部環境情報を入力としステアリング操作角度を出力とするハイブリッドシステム表現を用いたドライバ行動モデルを用いていた。しかし、特定の交差点形状へのみ対応していたことや、試行錯誤的なパラメータ設定が必要である点などの課題が残りモデルの有効性を示すことができなかった。そこで本研究では、人間は交差点で旋回する際に旋回先の車線中央へ進入するよう旋回し、旋回前の進行方向への変位に応じて車体角度を制御しているとの考え方に基づいた走行軌跡ベースのモデル<sup>[28]</sup>を用いる。停止線からの垂直変位距離を入力とし、車体角度を出力する原理のドライバモデルを構築する。以下にその旋回行動モデルの構築手法について説明する。本研究ではまず、任意形状の交差点での旋回走行データからモデル構築を行えるよう、まず、ドライビングシミュレータを用いて三名のドライバを対象に走行データ収集実験を行った。その結果をもとに、図 2.1 に示すような形式でモデル化を行っていく。停止線を旋回開始点 (原点) とし、旋回終了点は車体が進入車線に対して平行になった点とする。また、旋回前の進行方向と現在の車両進行方向のなす角を車体角  $\theta$  [deg] と定義する。旋回前と旋回後の走行車線のなす角を目標角  $\theta_t$  [deg] とする。また、車両の旋回開始点からの垂直変位距離  $d$  [m] を定義する。ここで、本研究では垂直変位距離  $d$  については、斜交座標系を導入しており、詳細は 2.2 節で後述する。また、旋回開始点から旋回前後の車線中央線の交点までの距離を最大変位距離  $d_{max}$  [m] とする。これにより交差角の異なる交差点においても、車体角が 0 の状態から旋回を開始し、変位が最大変位距離  $d_{max}$  になった際に車体角  $\theta$  が目標車体角  $\theta_t$  となる。このように車両走行軌跡データから垂直変位距離  $d$  と車体角  $\theta$  の値を収集し、その関係性を表したものを  $d$ - $\theta$  軌跡として図 2.2 のように示す。また、3 章で本研究における走行実験で使用するコースを説明するが、本研究では異なる交差角を持つ 5 種類の交差点旋回走行について検証する。このときに生成した  $d$ - $\theta$  軌跡の例を図 2.2 に示す。この  $d$ - $\theta$  軌跡の作成方法に関しては 4 章で詳しく後述する。この図 2.2 は縦軸を垂直変位距離  $d$  [m]、横軸を車体角度  $\theta$  [deg] で表している。Fig.2.2 において、左から交差角 60 度、80 度、90 度、100 度、120 度の交差点走行時のデータを示しており、それぞれ旋回後に第一車線と第二車線に進入する 2 パターンの  $d$ - $\theta$  軌跡を 10 本ずつまとめて表示している。そして、これらの走行軌跡全てにおいて、それぞれの最大値  $d_{max}$  [m]、 $\theta_t$  [deg]

で割ることで正規化処理をしたものが図2.3 で示される．縦軸は正規化した変位距離  $d[-]$  で横軸は正規化した車体角度  $\theta[-]$  を示している．この際，正規化後の  $d-\theta$  軌跡は交差点の形状によらずほぼ一定とみなす．また例として，交差角 90 度の交差点を持つ走行コースを旋回した際の  $d-\theta$  軌跡を図 2.4 に示す．図 2.4 の左は  $d-\theta$  軌跡，中央第一車線への旋回での正規化  $d-\theta$  軌跡，右は第二車線への旋回での正規化  $d-\theta$  軌跡を示している．正規化  $d-\theta$  軌跡の中での赤色の軌跡は各旋回パターン 10 本の  $d-\theta$  軌跡を平均したものである．このようにして求めた各旋回パターン 1 本，全旋回パターンで 10 本の  $d-\theta$  軌跡を図 2.5(a) にまとめて示した．最終的にこの平均値を求め，Fig.2.5(b) に示されるような 1 つの  $d-\theta$  軌跡を導出する．本研究では，この一本の  $d-\theta$  軌跡を，ドライバの運転特性を考慮して走行軌跡を作り出すドライバ旋回行動モデルとする．このように，垂直変位距離  $d$  と車体角  $\theta$  の値との関係性に着目することで，交差角が異なる交差点に対しても図 2.5(b) のような  $d-\theta$  軌跡型の単一のドライバ旋回行動モデルで扱うことが可能となる．このモデルに基づき，旋回したい交差点形状より定まる最大変位距離  $d_{max}$  と目標車体角度  $\theta_t$  の値を用いて，目標走行軌跡を導出する．なお，目標走行軌跡の詳しい導出方法は 2.3 節で詳しく後述する．

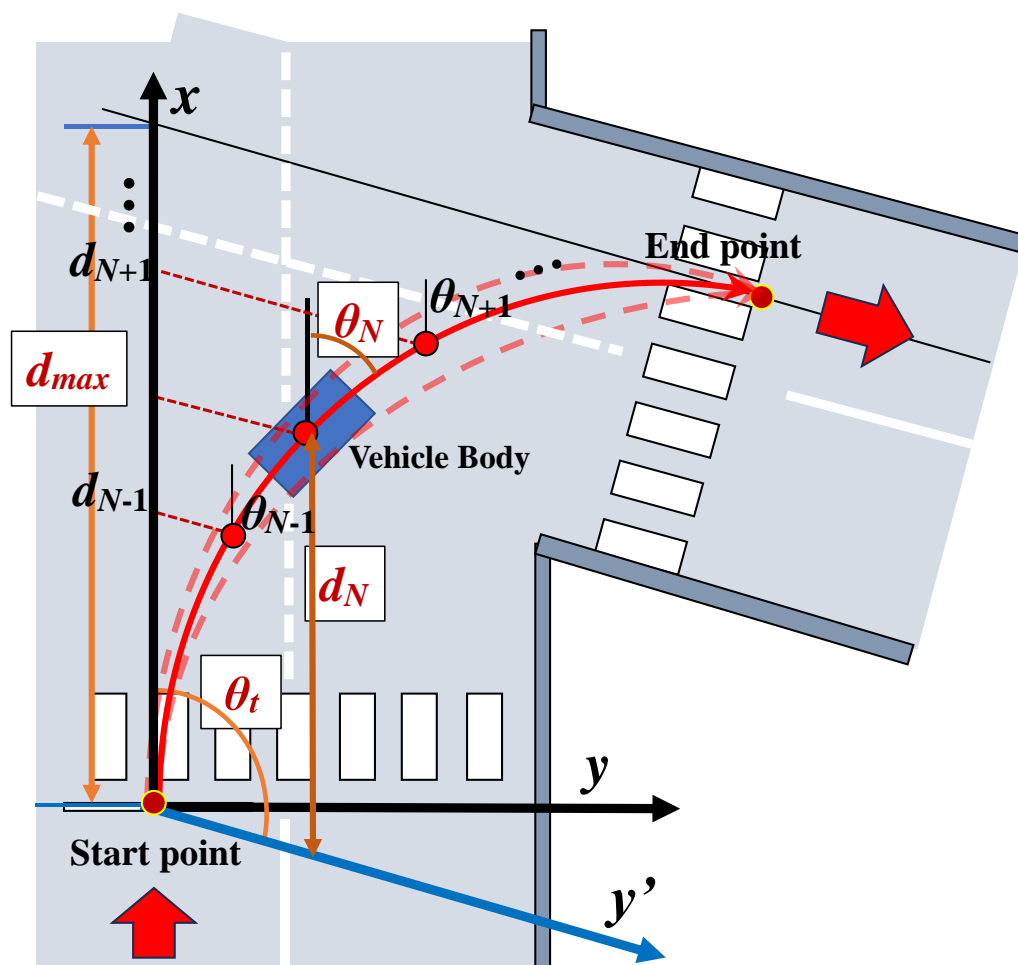


Fig.2.1 ドライバ旋回行動モデル概要



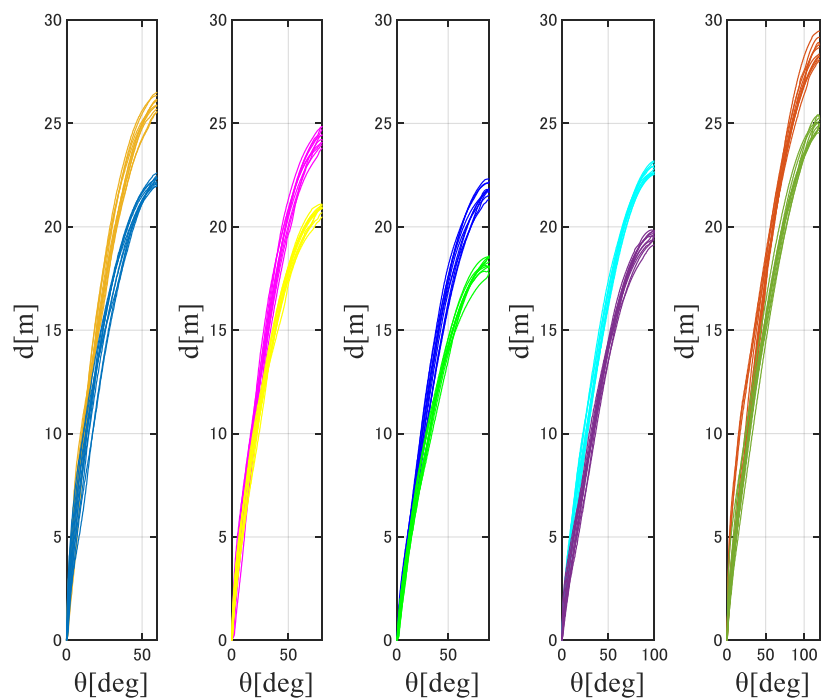


Fig.2.2 各旋回パターンの  $d$ - $\theta$  軌跡

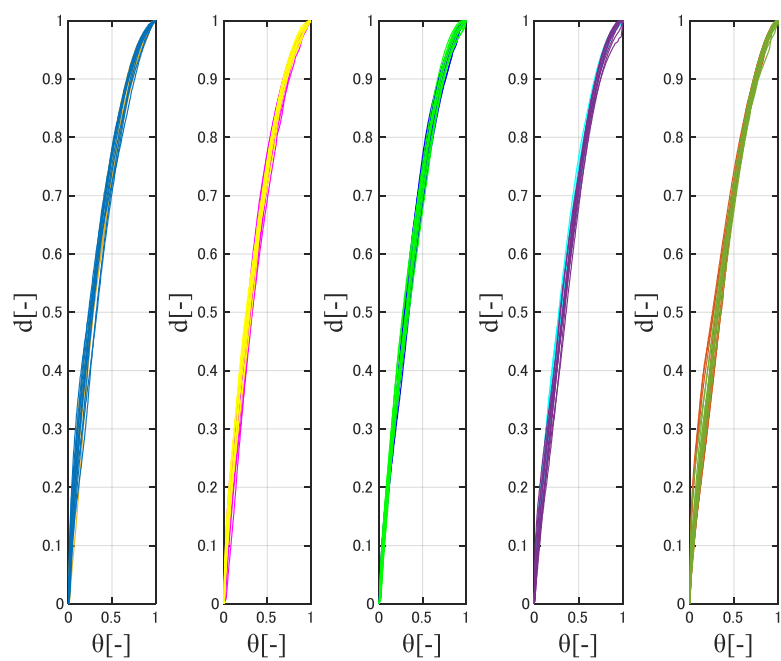


Fig.2.3 各旋回パターンの正規化  $d$ - $\theta$  軌跡

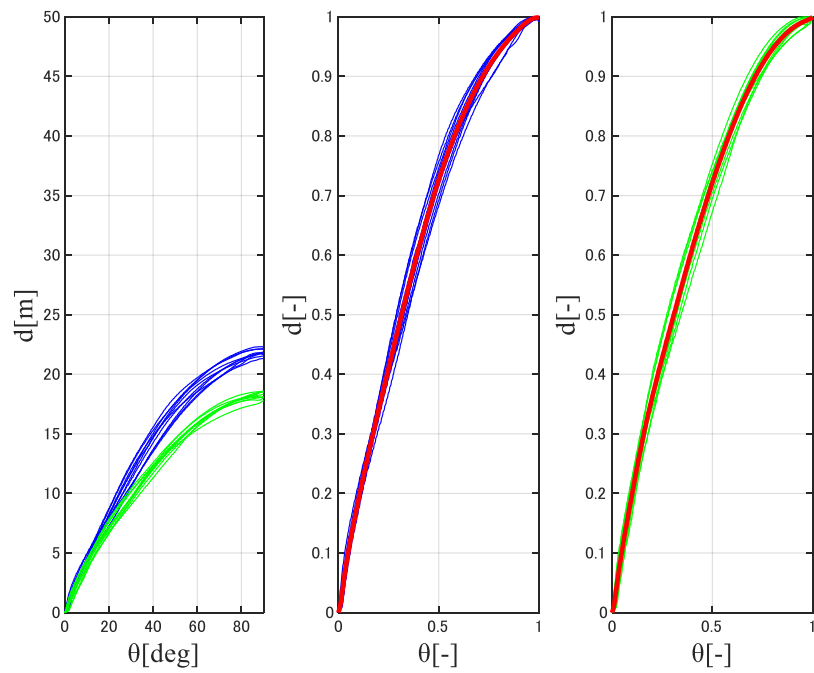
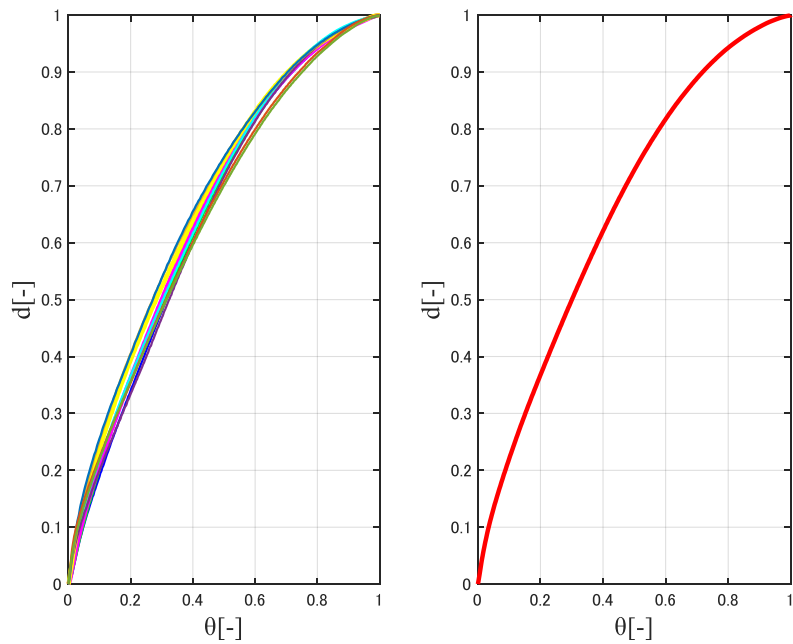


Fig.2.4 90 度交差点を旋回する際の  $d$ - $\theta$  軌跡



(a)全旋回パターンの正規化  $d$ - $\theta$  軌跡      (b)ドライバ旋回行動モデル

Fig.2.5 全旋回パターンの正規化  $d$ - $\theta$  軌跡とそれを平均化したドライバ旋回行動モデル

## 2.2 斜交座標系

交差角が 90 度以外の交差点を含む走行ルートにも対応するため、本研究で用いる垂直変位距離  $d$  については以下のような斜交座標系を用いている。この斜交座標系を用いることによって図 2.2 や図 2.3 のように交差角の異なるどの交差点においても、車体角 0 からスタートして、変位が最大変位距離  $d_{max}$  になった際に車体角  $\theta$  が目標車体角  $\theta_t$  となる。このように垂直変位距離と車体角の値を取ることで交差角が異なる複数の交差点を対象とした場合でも単一のモデルで適応させることが可能となる。ここから、実際に斜交座標系の導入過程について Fig2.6 を参考に説明する。このとき、旋回前の進行方向の  $x$  軸は変化せず旋回後の進行方向に平行な  $y'$  軸を定義し、 $x$ - $y$  座標系に対して  $x$ - $y'$  斜交座標系を設定する。斜交座標系の  $y'$  の値を用いて、垂直変位距離  $d$  を求めると

$$d = x - y' \sin(90 - \theta_t) \quad (2.1)$$

と表すことができる。また斜交座標系の  $y'$  と直交座標系の  $y$  の値との関係式は

$$y' = \frac{y}{\cos(90 - \theta_t)} \quad (2.2)$$

となり、この値を式(2.1)に代入すると垂直変位距離は

$$d = x - y \tan(90 - \theta_t) \quad (2.3)$$

で表すことができる。このようにして求めた斜交座標系での垂直変位距離  $d$  を用いることで  $d$ - $\theta$  軌跡を作成し、目標走行軌跡を導出する。

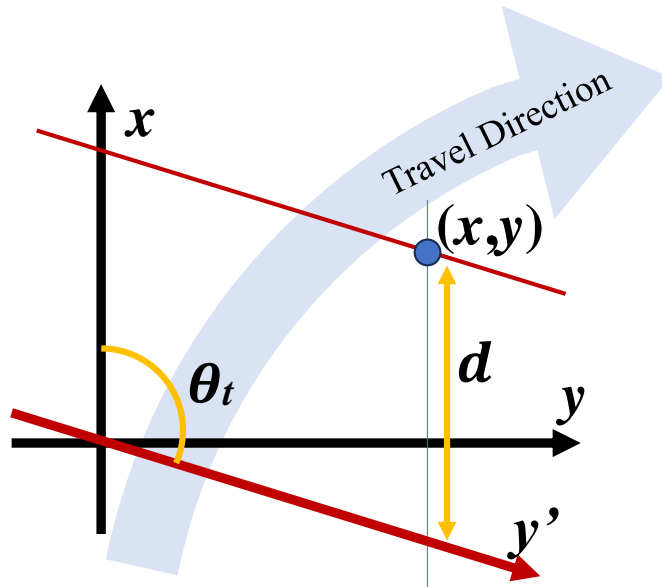


Fig .2.6 斜交座標系の概要

## 2.3 ドライバ旋回行動モデルから目標走行軌跡の導出

2.1 節で先述したようにドライバ旋回行動モデルを構築し、その  $d-\theta$  軌跡から目標走行軌跡を導出する。今節ではその導出過程について図 2.7 を参考にし、説明する。前提条件として、この目標走行軌跡では、導出対象とする交差点形状より得られた値に基づき交差点形状に対応可能な車両の位置座標推移を求めるため  $n-1$  回目の車両位置から  $n$  回目の車両位置を逐次計算して求める方式をとる。各計算ステップにて、計算誤差が少なるように車両は微小距離 0.01 [m] だけ車体角  $\theta_{n-1}$  方向に進むものとした。実際の手順について説明する。こまず、初期座標を  $(x_0, y_0, \theta) = (0, 0, 0)$  と設定する。次に、対象とする交差点形状から定まる  $d_{max}$  [m] と  $\theta_t$  [deg] を用いて対応する交差点での旋回走行に適応可能なドライバ旋回行動モデルの  $d-\theta$  軌跡を導出する。ここから、繰り返し計算を行い  $n$  回目の車両位置情報  $(x_n, y_n, \theta_n)$  を導出していく。先述したように  $n$  回目の車両位置  $(x_n, y_n)$  を  $n-1$  回目の車両位置から逐次計算して求め、微小距離  $l$  [m] 幅で車体角  $\theta_{n-1}$  方向に移動するものとしたので、 $n$  回目の車両位置  $(x_n, y_n)$  はそれぞれ次の 2.4 式と 2.5 式で表すことができる。

$$x_n = x_{n-1} + l \sin \theta_{n-1} \quad (2.4)$$

$$y_n = y_{n-1} + l \cos \theta_{n-1} \quad (2.5)$$

続いて、2.2 節で導入した斜交座標系を用いて垂直変位距離  $d_n$  を求めると

$$d_n = x_n - y_n \tan(90 - \theta_t) \quad (2.6)$$

となる。この垂直変位距離  $d_n$  とドライバ旋回行動モデルの  $d-\theta$  軌跡を用いて、 $d_n$  に近い前後の値を探し、内挿することで  $n$  回目における垂直変位距離  $d_n$  に対応する車体角  $\theta_n$  を求める。ここまでの一つの計算ステップとする。このように逐次計算で位置座標推移  $(x_n, y_n)$  を  $\theta_n$  が交差点形状より定まる目標車体角  $\theta_t$  となる旋回終了まで求め続けることで、旋回行動モデルから任意の交差点形状に対応する目標走行軌跡を導出することができる。ここで、例として目標車体角度が 90 度の交差点における旋回について目標走行軌跡を導出した結果を、交差点を上から見た軌跡で図 2.8 にて示す。これらのような目標走行軌跡に対し、フィードバック制御により車両追従制御を行うことで、ドライバ旋回行動モデルに基づく人の特性を反映した旋回行動が実現できる。

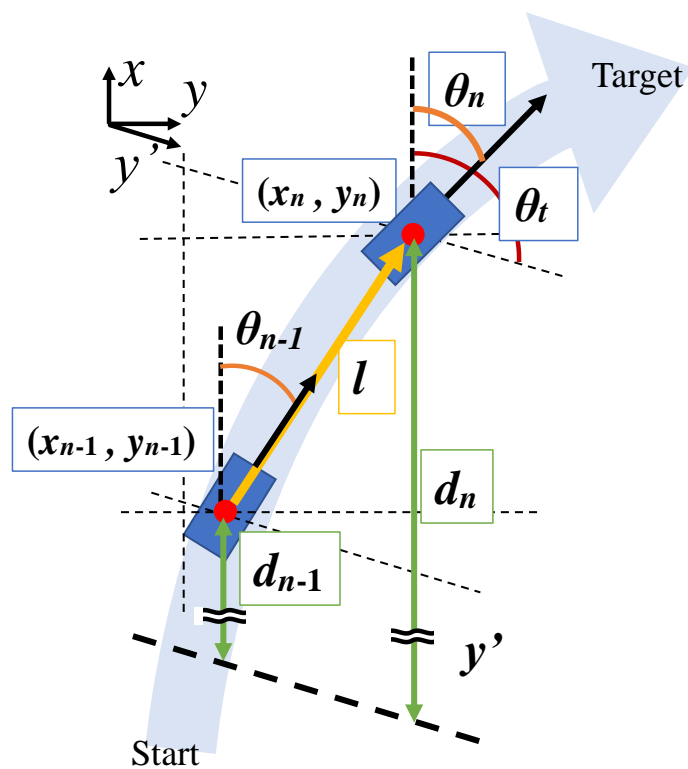


Fig.2.7 目標走行軌跡の導出法

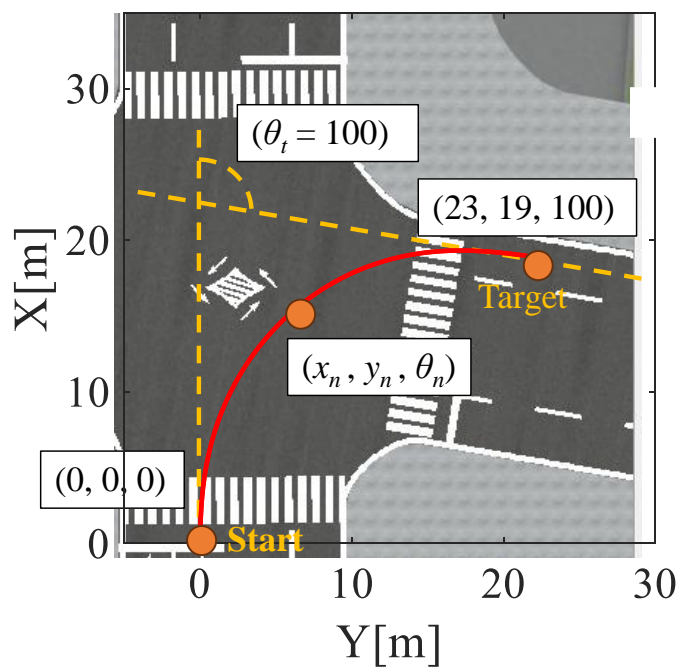


Fig.2.8 旋回パターン⑦での目標走行軌跡の導出例

# 第 3 章

## 実験装置と実験環境

本章では、本実験に使用した実験装置と実験環境について説明する。3.1 節では本実験で使用する走行データ収集用のドライビングシミュレータ（以下、DS と略す）について述べる。3.2 節では本研究で使用する実験走行環境について述べる。

### 3.1 ドライビングシミュレータの概要

本実験で使用する DS の構成図を図 3.1 に示す。本研究で使用する DS は、1 台の PC、ステアリングホイール（Thrustmaster 社製 T300RS）、アクセルペダル、ブレーキペダル、ディスプレイモニター（PHILIPS 社製 BDM4350UC/11）2 台とサブディスプレイ 1 台で構成されている。また、DS の外観を図 3.2 に示し、実験の様子は図 3.3 に示す。本研究ではシミュレーションソフトとして株式会社フォーラムエイトの UC-win/Road ver.17 を使用している。本ソフトを使用し、次節で説明する実験コースを一から作成し実験を行った。本研究では使用する二台の大型 4K モニターに車両正面と車両右方向の映像を表示する形で走行環境が映し出される。これにより本研究で評価対象とする交差点右旋回において重要な横方向の景色も含めて十分に表示可能であり、より自然な運転につながる。なお二台のモニターはパネルサイズ 42.51 インチ、縦横比 16:9、解像度 3840×2160 のものを使用している。また PC と各モニターの接続には UHD ケーブルを用いている。本 DS はシート着席時に実際の自動車の雰囲気近づけるため、実車と同じシートを使用している。また、ステアリングホイールは大径の製品を使用しており、実物のステアリングホイールに近い大きさで実際の操作感を再現している。また、これらのモニター、シートポジション、ステアリングホイール、ペダルは実車の配置位置に近くなるよう考慮して配置しており、普段自動車を運転できるように設計されている。このように本研究で用いる DS は可能な限り実際の自動車と同等の運転環境となるように考慮されており、より正確な運転情報の収集につながる。

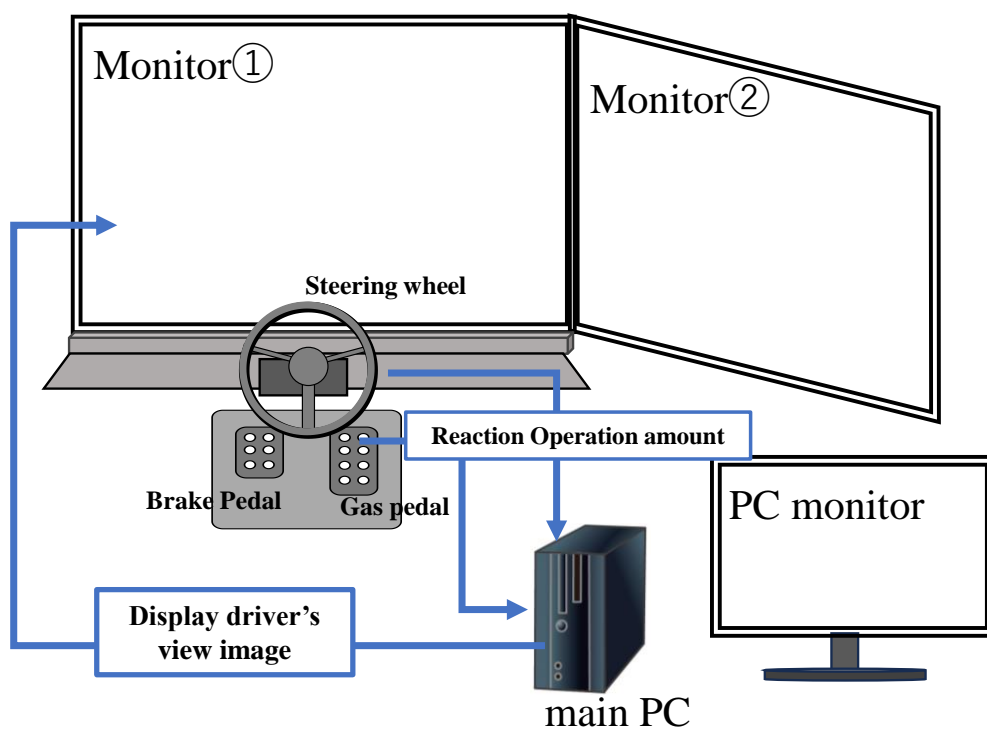


Fig.3.1 ドライビングシミュレータの構成図



Fig.3.2 ドライビングシミュレータの外観



Fig.3.3 実験の様子

## 3.2 実験環境

本研究では、DSを用いて走行データ収集実験を行い、ドライバ旋回行動モデル構築のための車両軌跡情報を取得する。その際に、DS上にて市街地を模擬した交差点の角度の違うコース5種類用意し走行実験を行った。それぞれ走行コース1(60度)、走行コース2(80度)、走行コース3(90度)、走行コース4(100度)、走行コース5(120度)と呼称することとする(括弧内は各走行コースにて旋回する交差点の持つ交差角)。本節ではこれら実験環境についてそれぞれ説明していく。

### 3.2.1 走行コース1

走行コース1の模式図を図3.4に示す。走行コース1は図3.4に示すように2本の片側2車線の直線道路が交わる交差点で、旋回前と旋回後の車線のなす角、交差角が60度の交差点である。スタート側の道路を約100m走行した後、交差点を右折し、進入側の道路を約100m走行する。また交差点脚長は40mmとして設定している。ドライバは旋回前の直線道路の右車線の位置から走行を開始し、交差点に進入して右折走行を行い、各旋回パターンで指定した車線に進入する。そして旋回後はあらかじめ指定した地点まで直進する。天候は晴れた状態であり、路面は乾いたものとして設定した。また、このコース1の環境内には、実験対象の車両以外にも他の車両が存在しているが、信号制御によって交通流のコントロールを行うことで右折走行に影響のないよう環境作成している。ここで、運転席からの視点映像を図3.5から図3.7に示す。それぞれ、順に交差点進入時、旋回途中、旋回後の映像を



示している。



Fig.3.4 走行コース 1 模式図



Fig.3.5 走行コース 1 の画像（交差点進入時）



Fig.3.6 走行コース 1 の画像（旋回中）



Fig.3.7 走行コース 1 の画像（旋回後）

### 3.2.2 走行コース 2

次に走行コース 2 の模式図を図 3.8 に示す。走行コース 2 は図 3.8 に示すように 2 本の片側 2 車線の直線道路が交わり、旋回前と旋回後の車線のなす角、交差角が 80 度の交差点である。ドライバは走行コース 1 と同様の条件の下で実験を行う。また、天候や路面状況、対向車や歩行者などの自車周囲の環境も走行コース 1 と同様である。運転席から見える交差点の映像例を図 3.9 から図 3.11 に示す。



Fig.3.8 走行コース 2 模式図

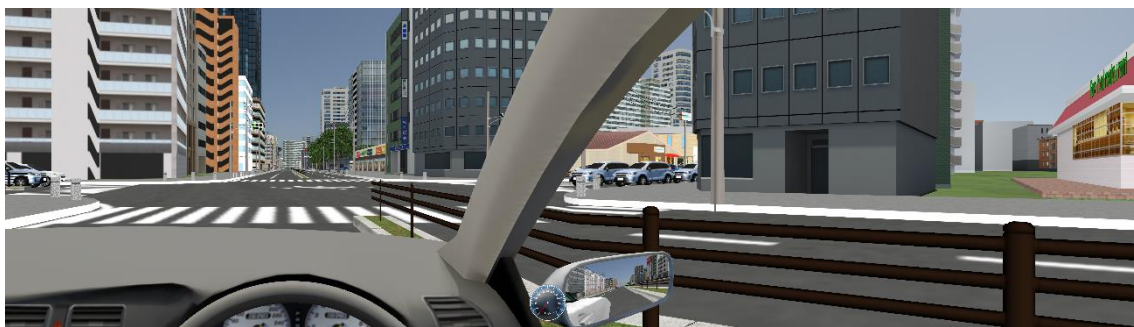


Fig.3.9 走行コース 2 の画像（交差点進入時）



Fig.3.10 走行コース 2 の画像（旋回中）



Fig.3.11 走行コース 2 の画像（旋回後）

### 3.2.3 走行コース 3

次に走行コース 3 の模式図を図 3.12 に示す。市街地コース 3 は図 3.16 に示すように片側 2 車線の直線道路と片側 2 車線の直線道路が交わり、旋回前と旋回後の車線のなす角、交差角が 90 度の交差点である。ドライバは走行コース 1 と同様の条件の下、実験を行う。また、天候や路面状況、対向車や歩行者などの自転車周囲の環境も走行コース 1 と同様である。運転席から見える交差点の映像例を Fig.3.13 から Fig.3.15 に示す。また、例としてコース 3 に含まれる交差角 90 度の交差点付近の様子を図 3.16 に示す。



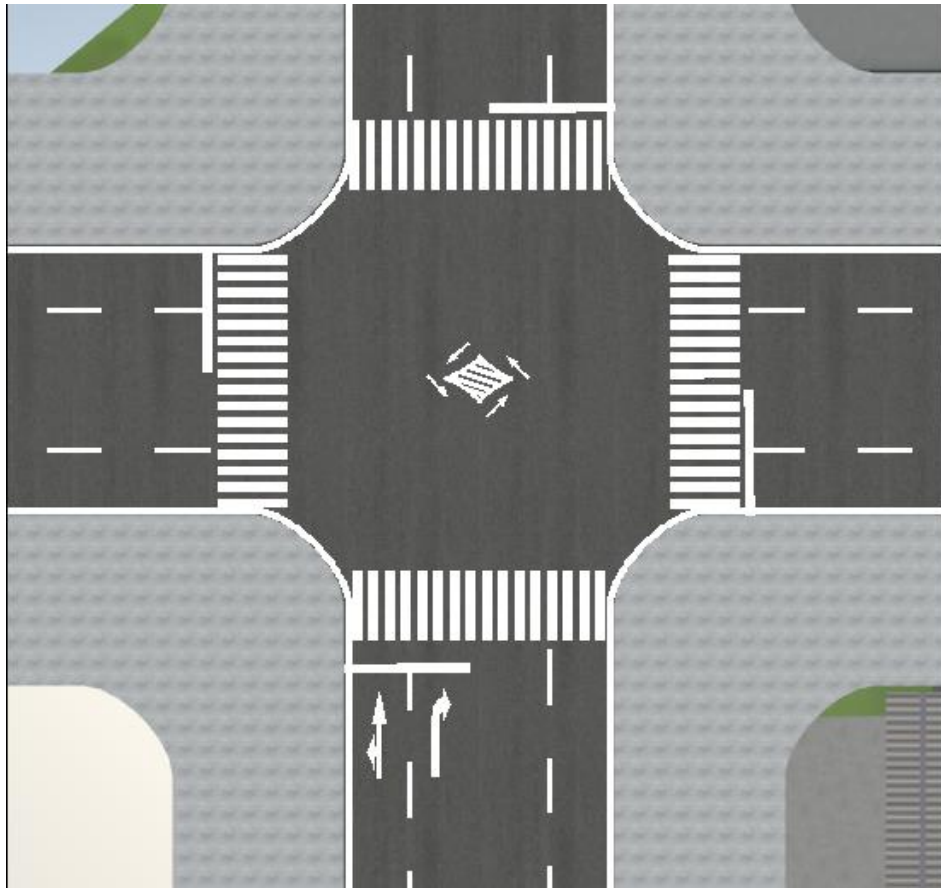


Fig.3.12 走行コース 3 模式図

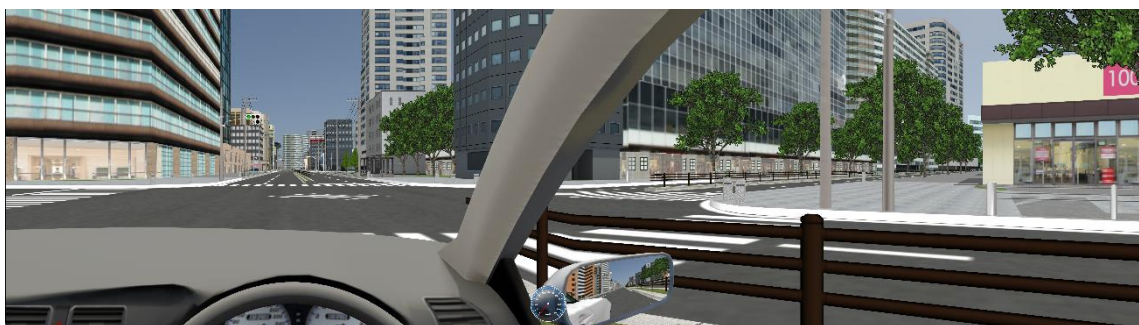


Fig.3.13 走行コース 3 の画像（交差点進入時）

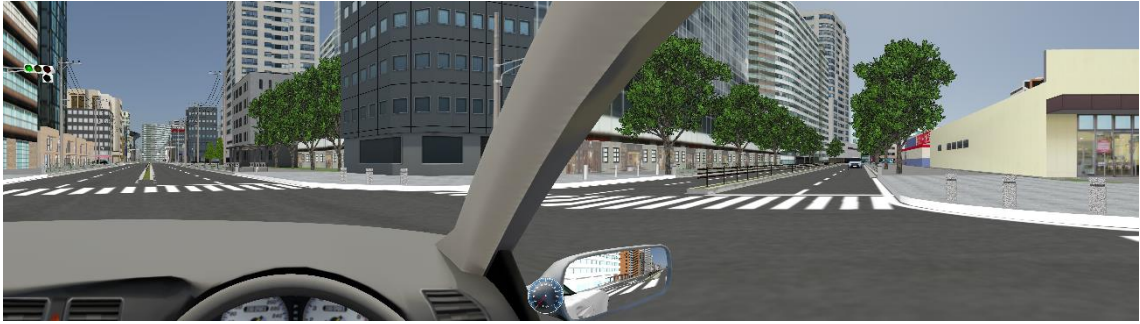


Fig.3.14 走行コース 3 の画像（旋回中）



Fig.3.15 走行コース 3 の画像（旋回後）



Fig.3.16 走行コース 3 の画像例

#### 3.2.4 走行コース 4

次に走行コース 3 の模式図を図 3.17 に示す. 走行コース 3 は図 3.17 に示すように片側 2 車線の直線道路と片側 2 車線の直線道路が交わり, 旋回前と旋回後の車線のなす角, 交差角が 100 度の交差点である. ドライバは走行コース 1 と同様の条件の下, 実験を行う. また, 天候や路面状況, 対向車や歩行者などの自転車周囲の環境も走行コース 1 と同様である. 運転席から見える交差点の映像例を Fig.3.18 から Fig.3.20 に示す.

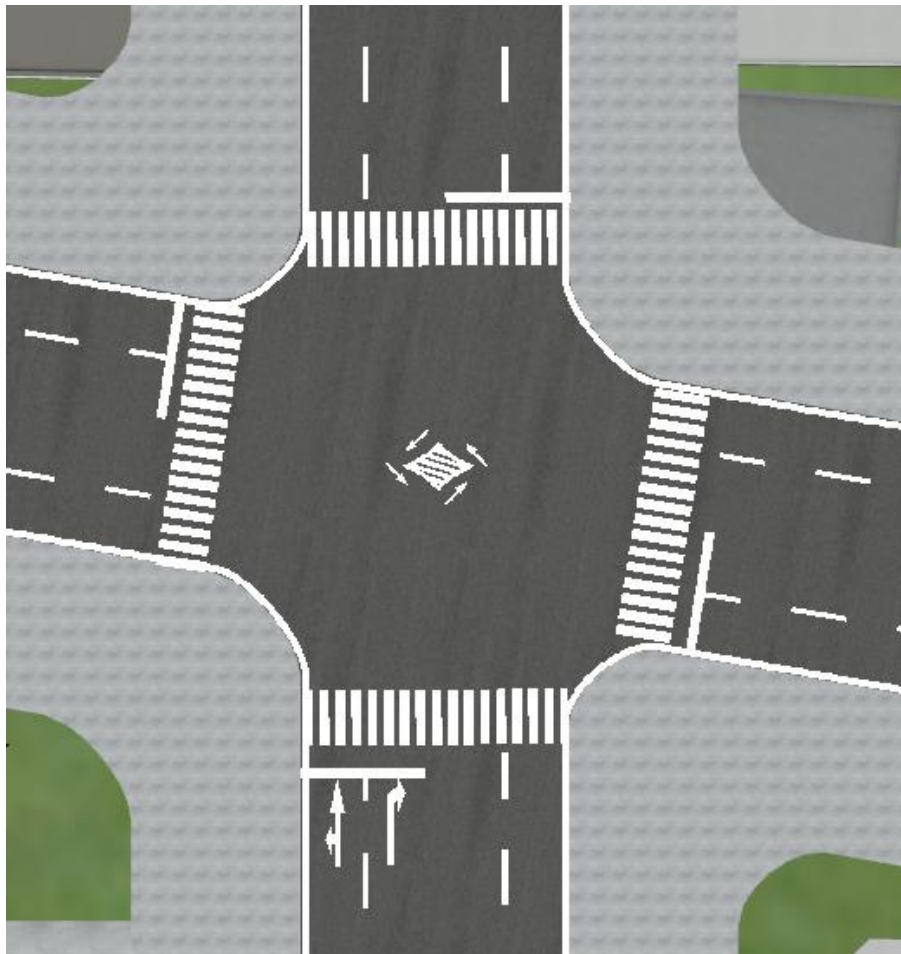


Fig.3.17 走行コース 4 模式図



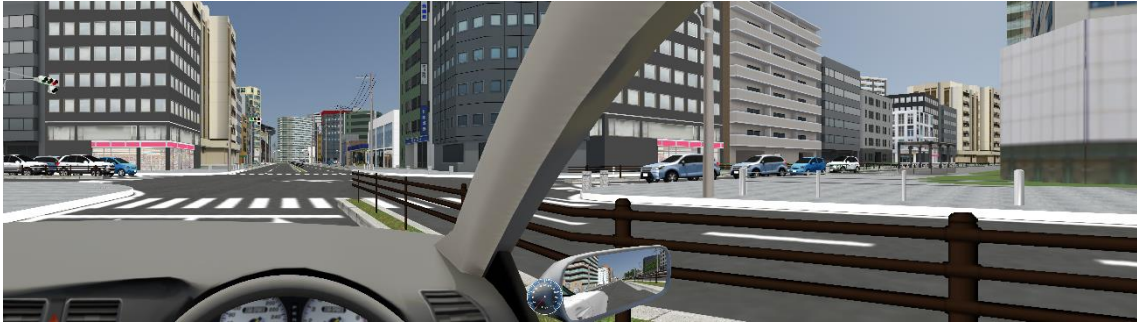


Fig.3.18 走行コース 4 の画像（交差点進入時）

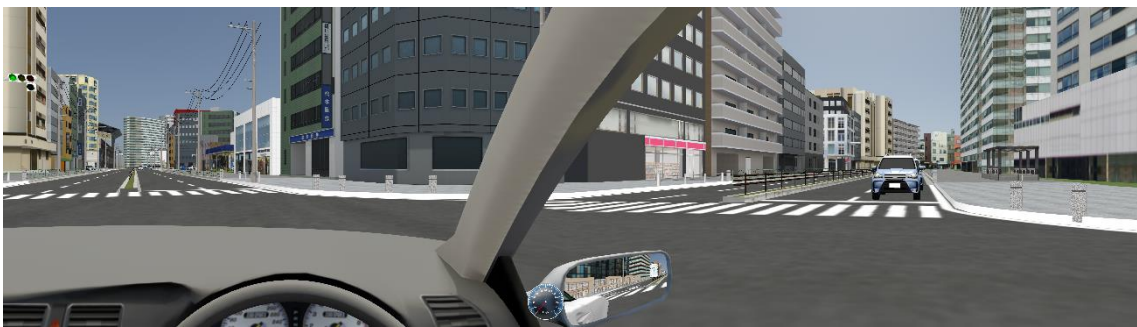


Fig.3.19 走行コース 4 の画像（旋回中）



Fig.3.20 走行コース 4 の画像（旋回後）

### 3.2.5 走行コース 5

次に走行コース 3 の模式図を図 3.21 に示す。走行コース 3 は図 3.21 に示すように片側 2 車線の直線道路と片側 2 車線の直線道路が交わり、旋回前と旋回後の車線のなす角、交差角が 120 度の交差点である。スドライバは走行コース 1 と同様の条件の下、実験を行う。また、天候や路面状況、対向車や歩行者などの自車周囲の環境も走行コース 1 と同様である。運転席から見える交差点の映像例を図 3.22 から図 3.24 に示す。

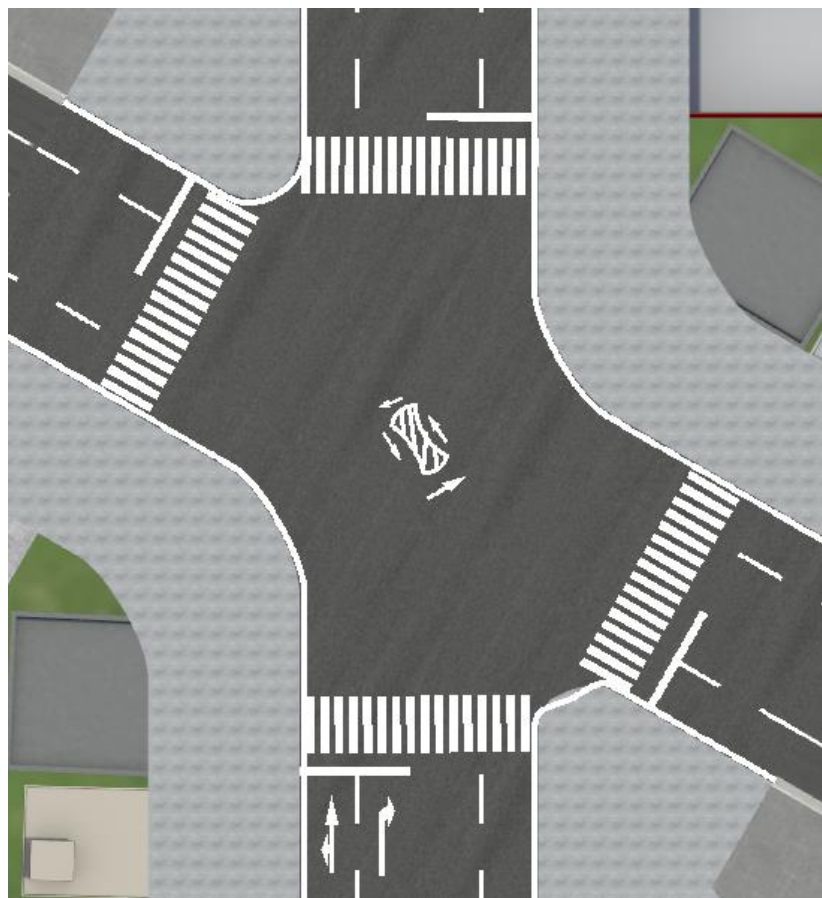


Fig.3.21 走行コース 5 模式図



Fig.3.22 走行コース 5 の画像（交差点進入時）



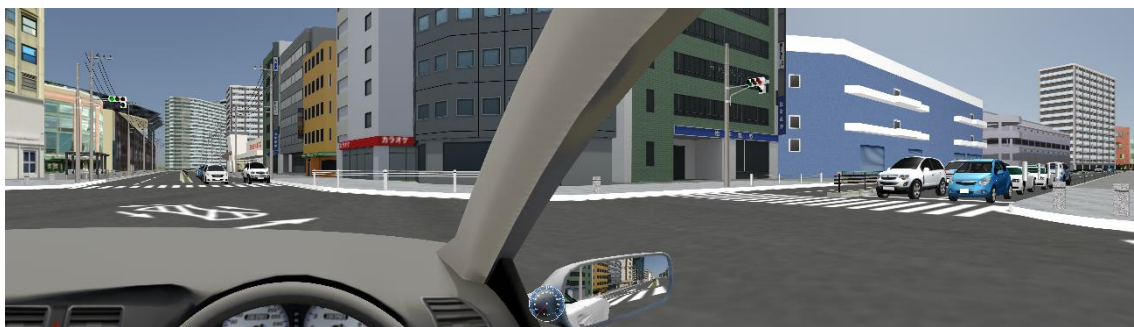


Fig.3.23 走行コース5の画像（旋回中）



Fig.3.24 走行コース5の画像（旋回後）

## 第 4 章

# ドライバ旋回行動モデルの構築 とモデルの有効性検証

本章では、第 2 章で示したドライバ旋回行動モデルを構築していく。まず、4.1 節ではドライバ旋回行動モデルを構築するために行ったドライバの走行データ収集実験とその実験結果について述べる。次に 4.2 節では収集した運転情報を基にドライバ旋回行動モデルの構築過程について述べる。4.3 節ではドライバ旋回行動モデルによって導出される走行軌道と走行データ収集実験の走行軌跡との比較を行い、軌道誤差を評価する形でモデルの有効性を検証する。

### 4.1 走行データ収集実験

#### 4.1.1 実験方法

ドライバの走行データから車両走行軌跡を収集するため、第 3 章で説明した DS を用いてドライバの旋回行動に関する走行データ収集実験を行った。本節では、実際の実験の方法について述べる。本研究では、3.2 節で示した実験環境を用いて実験を行った。走行データ収集実験は、交差角の異なる交差点を含む走行コース 1, 2, 3, 4, 5 を使用し、ドライバがそれぞれの交差点を右に旋回する際の走行データの収集を行った。本研究で使用する実験コースには、実験対象の車両以外にも他の車両が存在しているが、信号制御によって交通流のコントロールを行うことで右折走行に影響のないよう環境作成している。実験協力者の運転する車両はスタート地点から発進し、交差点の手前で適切な速度にまで減速する。この際に速度に関する特定の指示はなく、実験協力者は道路交通法で定められた範囲内で任意の速度で走行する。そして、交差点に進出したのちに右折旋回を行う。ドライバには可能な限り普段通りの運転を心がけるように指示をしてあり、安全な走行を行ってもらう。実験では、交差点右折時の旋回行動モデル構築のため、交差角が 60 度の交差点を含む走行コース 1 では右折後に旋回先の第一走行車線に進入する場合と第二走行車線に進入する場合の 2 パタ

ーンの旋回走行ルートを用意した。旋回パターンは図 4.1 に示す。60 度の交差点右折後に第一走行車線に進入する場合をパターン①、第二走行車線に進入する場合をパターン②とする。また、交差角が 80 度の交差点を含む走行コース 2 でも同様に 2 パターンの旋回方法を用意した。旋回パターンを図 4.2 に示す。この際、走行コース 1 の場合と同様にして、第一走行車線に進入する場合をパターン③、第二走行車線に進入する場合をパターン④とする。交差角が 90 度の交差点を含む走行コース 3 でも同様に 2 パターンの旋回方法を用意した。旋回パターンを図 4.3 に示す。第一走行車線に進入する場合パターン⑤、第二走行車線に進入する場合パターン⑥とする。交差角が 100 度の交差点を含む走行コース 4 でも同様に 2 パターンの旋回方法を用意した。旋回パターンを図 4.4 に示す。第一走行車線に進入する場合パターン⑦、第二走行車線に進入する場合パターン⑧とする。交差角が 120 度の交差点を含む走行コース 3 でも同様に 2 パターンの旋回方法を用意した。旋回パターンを Fig4.5 に示す。第一走行車線に進入する場合パターン⑨、第二走行車線に進入する場合パターン⑩とする。尚、この走行データ収集実験を行うにあたって、実験協力者に DS での走行に慣れてもらうためにも、全ての旋回パターンについて十分な練習走行を行った後に実験を行った。実験協力者は日常から一定の頻度で自動車を運転している 20 代の男性三名で実験を行った。それぞれのドライバについて、走行回数は各旋回パターン 10 本ずつ走行し、計 100 回分の走行データを収集した。よって 3 名分で合計 300 本の走行データを収集した。



Fig.4.1 走行データ収集実験旋回パターン（走行コース 1）

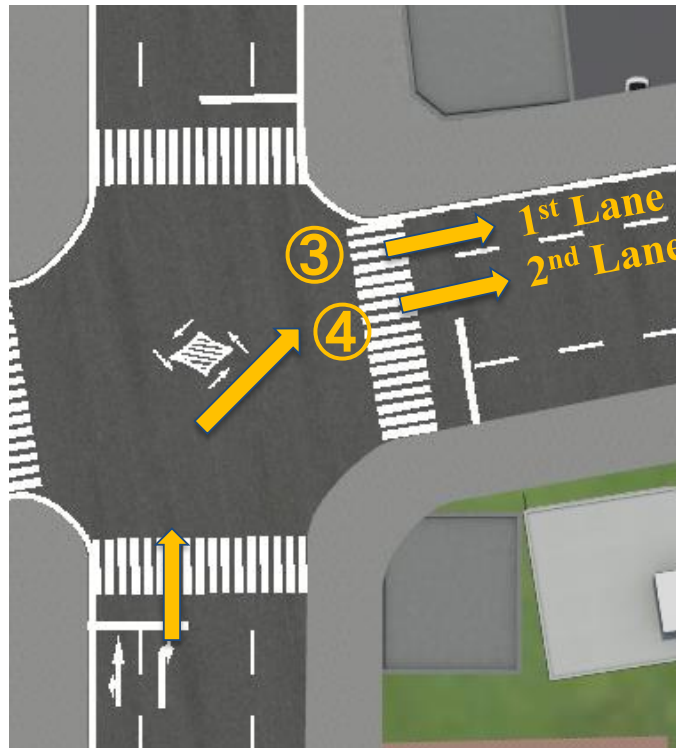


Fig.4.2 運転情報収集実験巡回パターン（走行コース2）

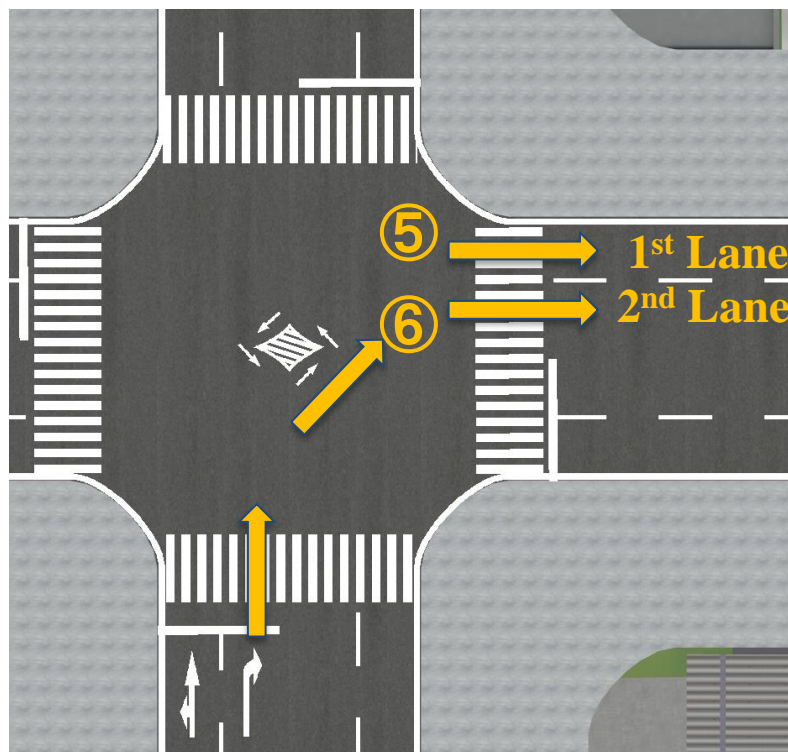


Fig.4.3 走行データ収集実験巡回パターン（走行コース3）

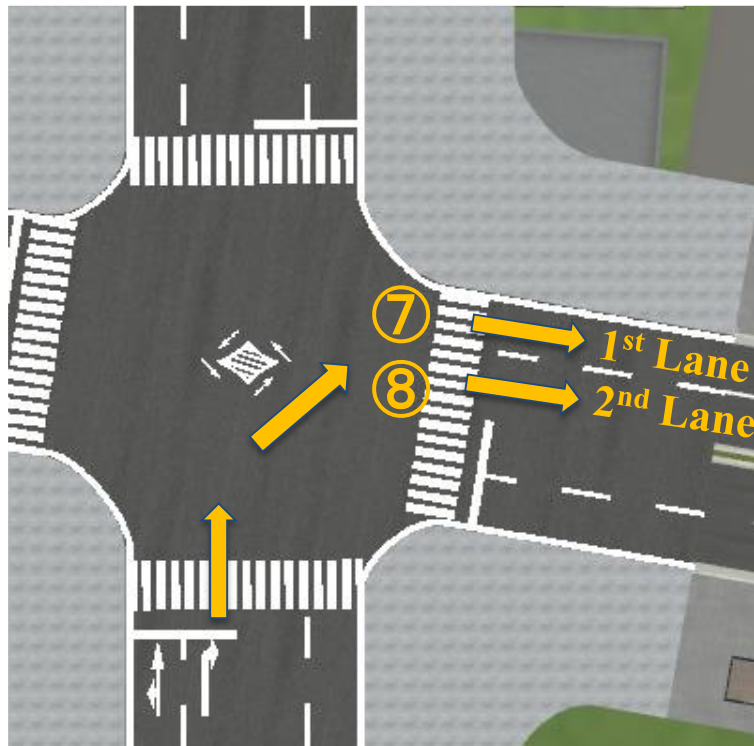


Fig.4.4 走行データ収集実験巡回パターン（走行コース4）

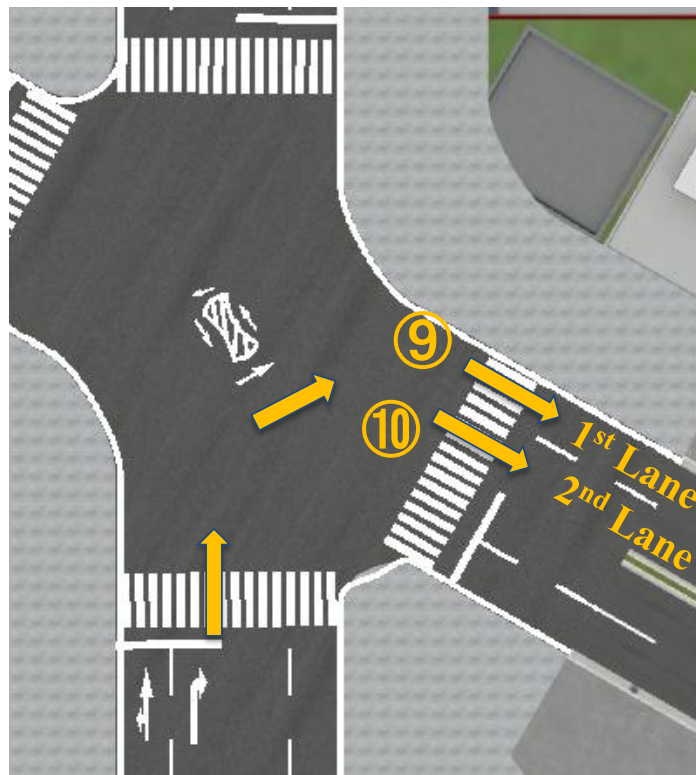


Fig.4.5 走行データ収集実験巡回パターン（走行コース5）

#### 4.1.2 走行データ収集実験結果

今回、構築するドライバ旋回行動モデルに使用する走行データは、異なる交差角を持つ各交差点の各車線に進入する計 10 パターンの旋回走行で 100 回の走行実験、それをドライバ A, B, C 三名分の計 300 本車両走行軌跡データの中から、各旋回パターンについて三名のデータのドライバの人員配分が適当になるよう注意した上で無作為にそれぞれ 10 本の走行データ、全旋回パターン合計 100 本の車両走行軌跡データを抽出したものとした。それらの走行データについて、前節の手順で行った走行データ収集実験から得られた各交差点旋回における車両走行軌跡の結果例を図 4.6 から図 4.10 に示す。これらの縦軸は相対座標における相対座標における X 方向変位[m]、横軸は相対座標における Y 方向変位[m]であり、上から見た車両走行軌跡を青色の軌跡で示している。続いて、これらの車両走行軌跡データについて、旋回区間において一番外側を走行した車両走行軌跡データ（ピンク色）と内側を走行した車両走行軌跡データ（黄色）を抽出し、旋回途中の進行方向に対して横方向の幅が最大となった際の値を対象のドライバ走行データが持つ運転のばらつきとして定義した。図 4.11 から図 4.15 にその結果を示す。水色の線は旋回軌道の幅が最大となった点での進行方向に対する垂線を示している。この際、各旋回パターンにおける走行のばらつきを評価した際に使用した垂線について、各旋回パターンの番号をつけて示している。このようにして、それぞれの旋回パターンにおける走行軌道の横方向の幅の最大値算出結果を人間の持つ運転のばらつきとして表 4.1 にまとめて示す。この表から、ほぼすべての旋回パターンにおいて運転のばらつきが 1 から 1.5m 程度となっていることが分かる。また、本研究でモデル構築に使用する走行データにおける全旋回パターンでの走行データばらつきの平均は 1.456m となっている。さらに、次節以降でドライバ旋回行動モデルの有効性を検証する際の参考値とするため、ドライバ A, B, C の三名分、計 300 本の走行データについて、モデル構築に用いなかったデータも含め、各旋回パターンにおけるドライバ個別の運転のばらつきと、全旋回パターンでの平均値を同様の方法で求めた。その結果を表 4.2 から表 4.4 に示す。各ドライバの走行データについて個別で見ると、ドライバ A の 90 度交差点、第二車線への旋回の運転のばらつきが 1.7m。ドライバ B の場合は 100 度の交差点旋回を除くほぼすべての旋回パターンで運転のばらつきが 1.2 から 1.4m 付近となっている。さらにドライバ C については、120 度交差点、第二車線への旋回の運転のばらつきが 1.4m と比較的ばらつきが大きくなっている。さらに、全ての旋回パターンにおける運転のばらつきを平均するとドライバ A では 1.183m、ドライバ B では 1.114m、ドライバ C では 1.097m となっている。このことからドライバ個人を対象に考えた際、人間が交差点を旋回走行する際は進行方向に対して横方向に 1.1m 程度のばらつきは許容の範囲内となるとの仮定した上で本モデルの評価及び検証を行っていくものとする。



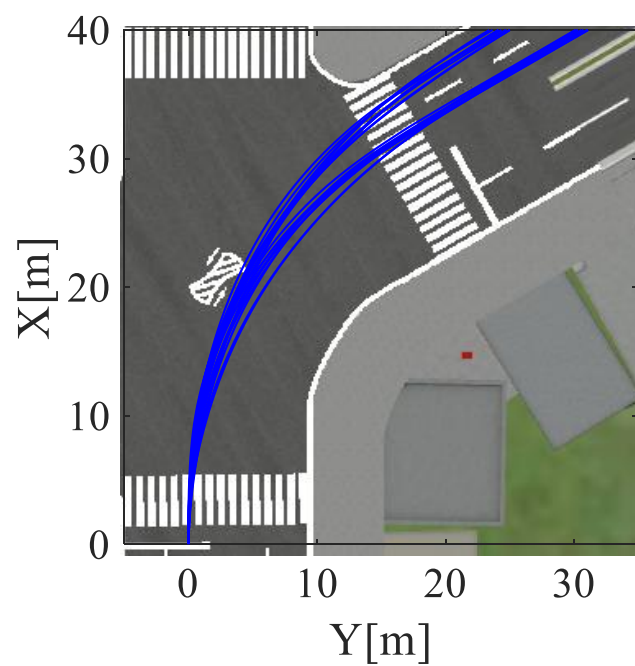


Fig.4.6 走行コース 1 の走行データ収集実験結果

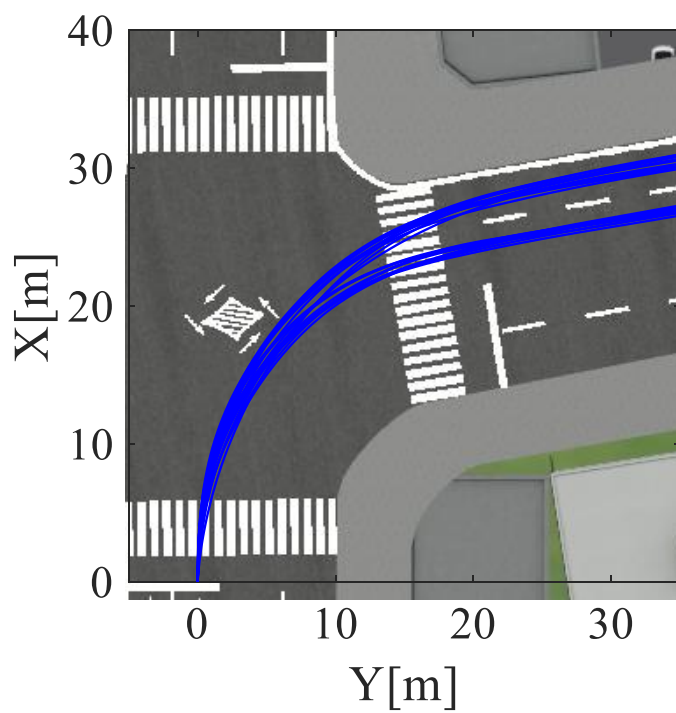


Fig.4.7 走行コース 1 の走行データ収集実験結果

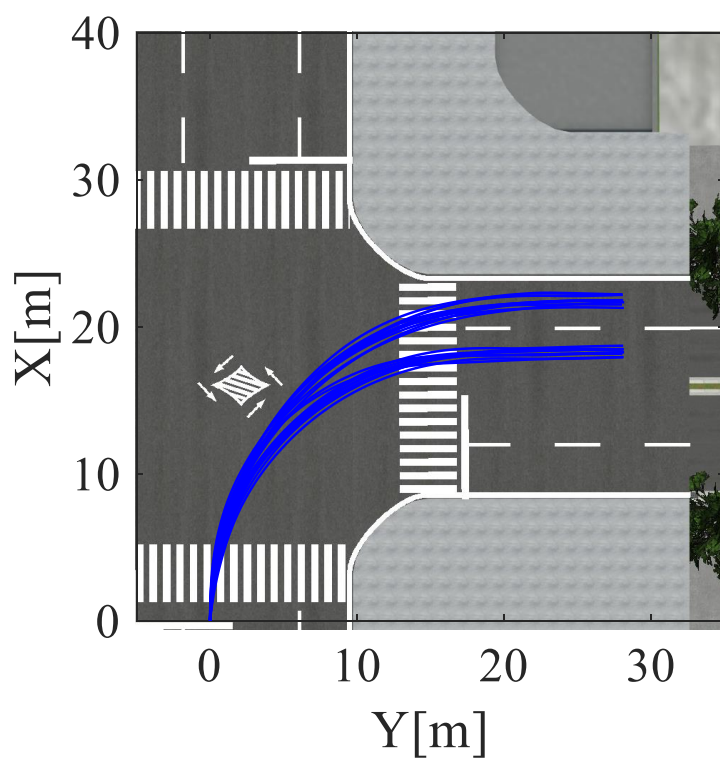


Fig.4.8 走行コース2の走行データ収集実験結果

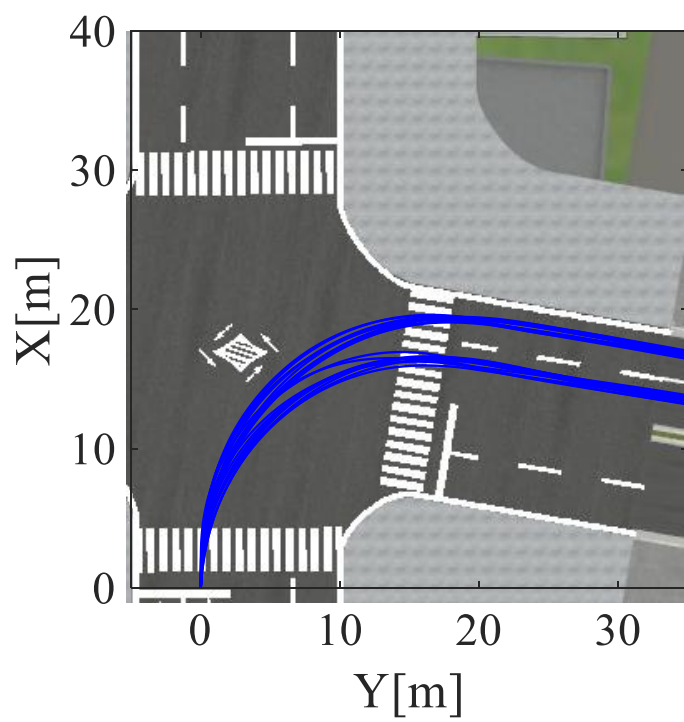


Fig.4.9 走行コース2の走行データ収集実験結果



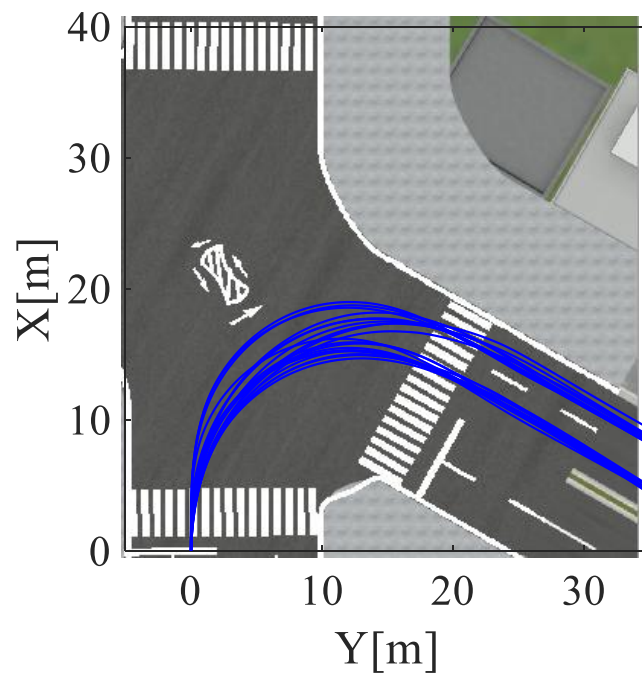


Fig.4.10 走行コース3の走行データ収集実験結果

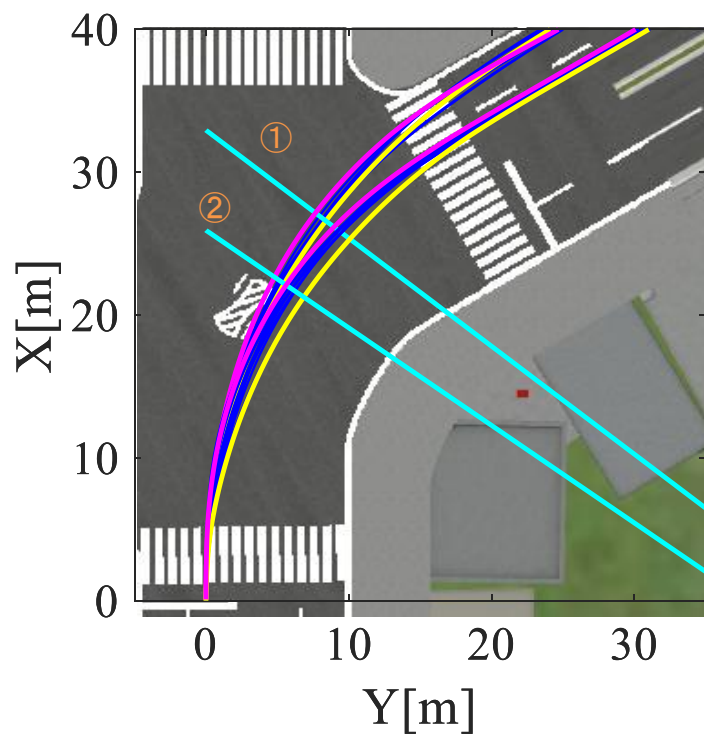


Fig.4.11 走行コース1での走行データばらつき算出

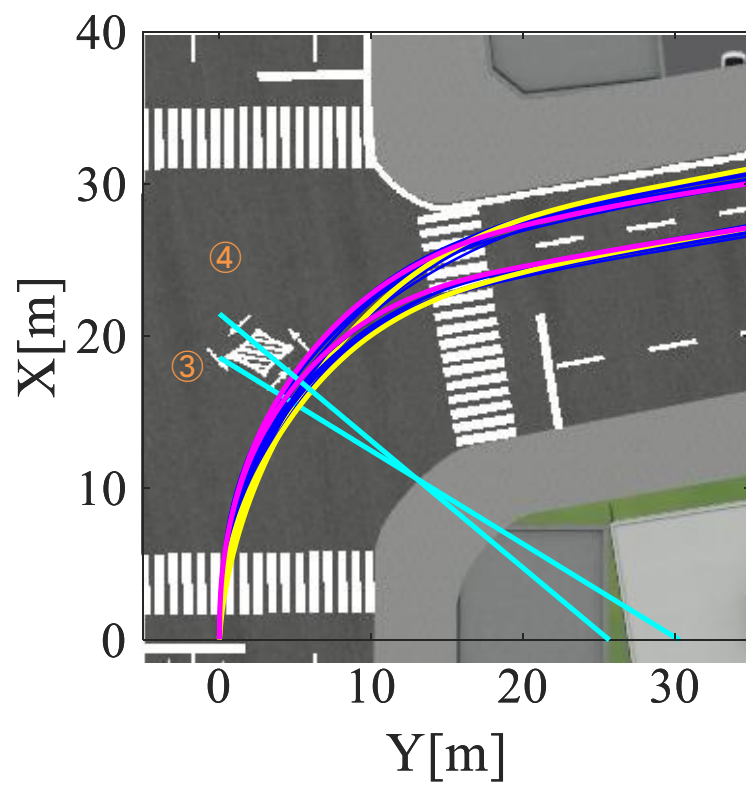


Fig.4.12 走行コース 2 での走行データばらつき算出

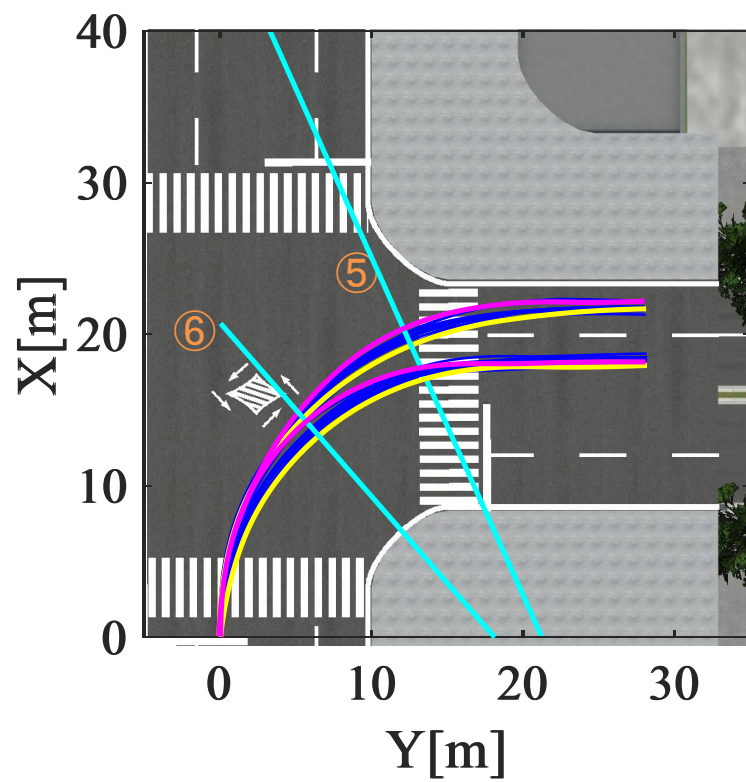


Fig.4.13 走行コース 3 での走行データばらつき算出

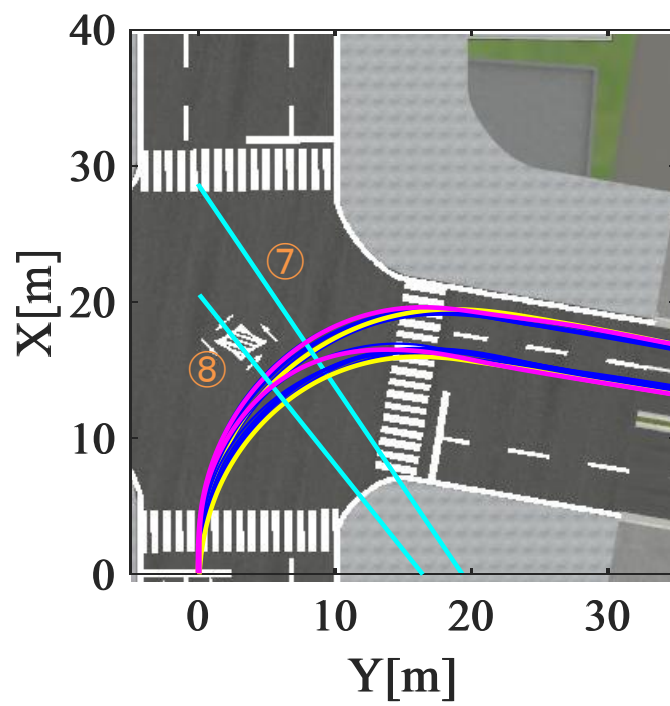


Fig.4.14 走行コース 4 での走行データばらつき算出

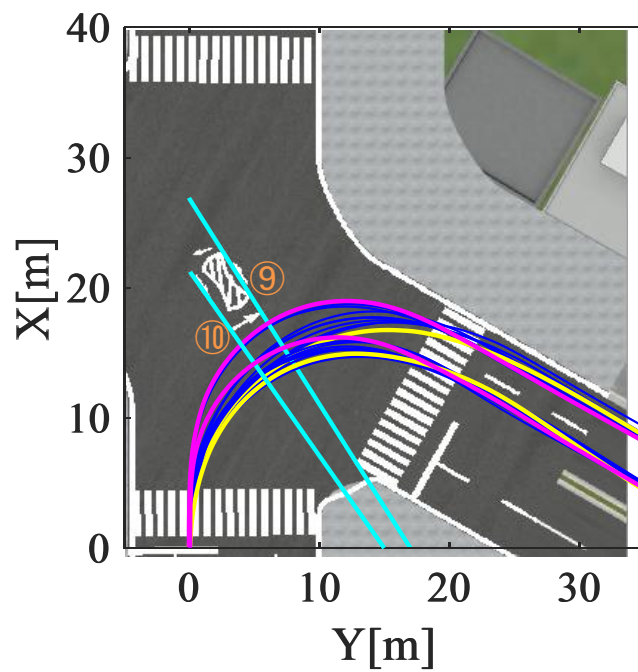


Fig.4.15 走行コース 5 の走行データばらつき算出

Table.4.1 モデル構築に使用した走行データばらつき

	60deg		80deg		90 deg		100 deg		120 deg		Lane average	Total average	SD
1st lane	①	0.915	③	1.221	⑤	1.215	⑦	1.134	⑨	3.163	1.53	1.46	0.61
2nd lane	②	1.495	④	1.058	⑥	1.271	⑧	1.429	⑩	1.660	1.38		

Table.4.2 ドライバ A 運転のばらつき

	60deg		80deg		90 deg		100 deg		120 deg		Lane average	Total average	SD
1st lane	①	1.140	③	1.146	⑤	1.231	⑦	1.134	⑨	0.997	1.13	1.18	0.21
2nd lane	②	1.092	④	0.965	⑥	1.777	⑧	1.208	⑩	1.138	1.24		

Table.4.3 ドライバ B 運転のばらつき

	60deg		80deg		90 deg		100 deg		120 deg		Lane average	Total average	SD
1st lane	①	1.257	③	1.222	⑤	1.308	⑦	0.992	⑨	1.478	1.25	1.11	0.22
2nd lane	②	1.279	④	0.754	⑥	1.066	⑧	0.795	⑩	0.993	0.98		

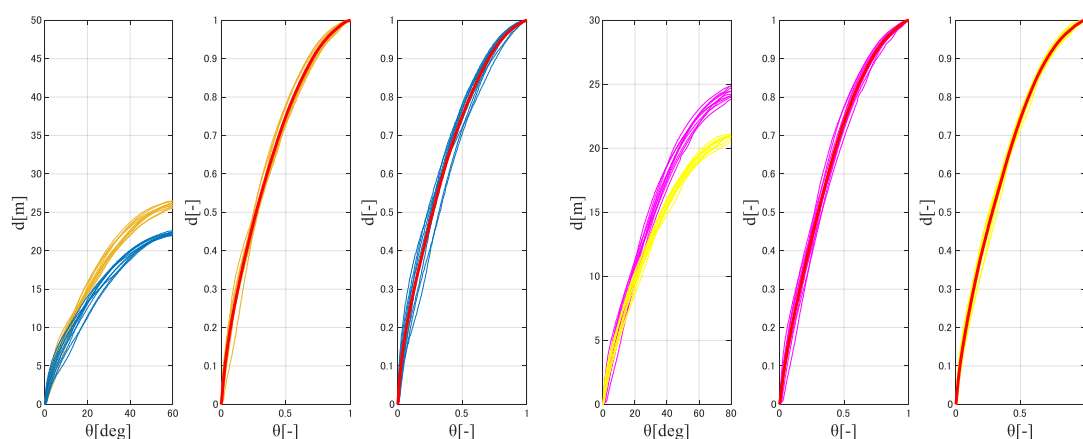
Table.4.4 ドライバ C 運転のばらつき

	60deg		80deg		90 deg		100 deg		120 deg		Lane average	Total average	SD
1st lane	①	1.131	③	1.283	⑤	1.138	⑦	1.104	⑨	1.099	1.15	1.10	0.21
2nd lane	②	1.200	④	1.082	⑥	0.594	⑧	0.936	⑩	1.407	1.04		

## 4.2 ドライバ旋回行動モデルの構築

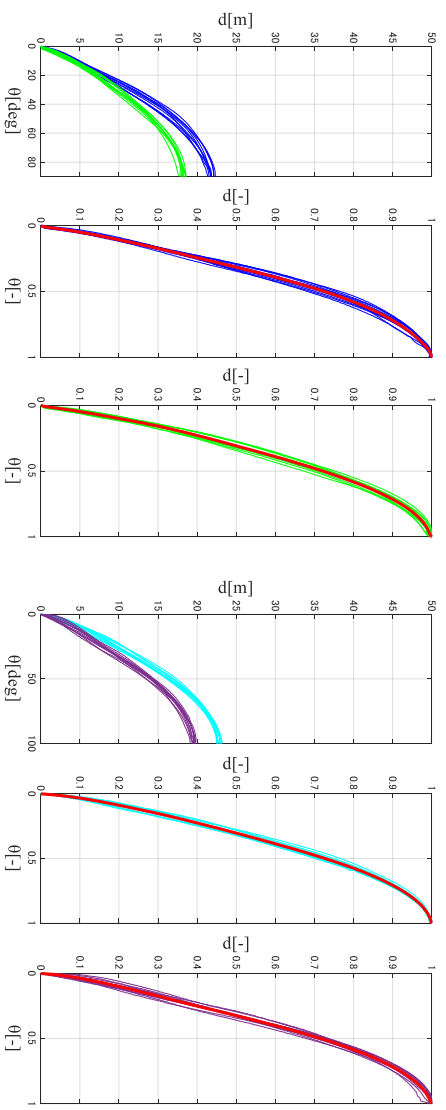
4.1 節で述べたように、各旋回パターンにおいて 10 本、全旋回パターン合計 100 本の走行データを抽出した。これらの車両走行軌跡データを使用し、2 章で前述した手法を用いてドライバ旋回行動モデルを構築する。まず、各旋回パターンの車両走行軌跡データについて垂直変位距離と車体角度の関係を抽出したものを図 16 から図 18 のように  $d-\theta$  軌跡として導出する。図 16 から図 18 の  $d-\theta$  軌跡は、各旋回パターンについて別の色で示しており、それぞれの左図について縦軸は垂直変位距離  $d$  [m]、横軸は進行方向角  $\theta$  [deg]となっている。図 16 から図 18 の左図では、旋回する交差点ごとに縦軸の変位距離と横軸の車体角の値はそれぞれ異なっている。続いて、それらを各旋回パターンにおける変位距離と車体角の最大値でそれぞれ正規化したものを図 16 から図 18 の中央と右の図に示す。図 16 から図 18 の中央図は各交差点旋回後に第一車線へ進入した時、図 16 から図 18 の右図は第二車線への進入時のグラフを示している。それぞれ横軸は正規化した車体角度  $\theta[-]$ で、縦軸は正規化した変位距離  $d[-]$ である。これにより交差点形状によらず、各旋回パターンにおける  $d-\theta$  軌跡の最大値がすべて 1 となる。つまり、どのような形状の交差点を旋回する際も、変

位距離と車体角度の値が旋回開始時の 0 から始まり、旋回終了時には最大値 1 となる．こうして、異なる交差点形状同士でも  $d$ - $\theta$  軌跡を同列に比較することが可能となる．次に各旋回パターンについて正規化した 10 本の  $d$ - $\theta$  軌跡をそれぞれ平均化することで各旋回パターンにつき 1 本の  $d$ - $\theta$  軌跡を導出する．これを図 16 から図 18 の中央、右図にてそれぞれ赤色の軌跡で示してある．この平均データを表す  $d$ - $\theta$  軌跡を各旋回パターンでの旋回特性を表現する代表データとし、全 10 旋回パターンについて用意するので、合計 10 本の平均  $d$ - $\theta$  軌跡をモデル構築に用いる．これらをまとめたものを図 4.19 の(a)に示す．この際  $d$ - $\theta$  軌跡の色は図 16 から図 18 と同様の色で示している．最終的に、この平均化した  $d$ - $\theta$  軌跡 10 本をさらに全旋回パターンで平均した一本の  $d$ - $\theta$  軌跡を図 4.19 の(b)に示す．この図も同様に横軸は正規化した車体角度  $\theta$ [-]で、縦軸は正規化した変位距離  $d$ [-]である．この研究では、任意形状の交差点旋回走行に対して、一つの旋回行動モデルで可能な限り汎用性高く複数のドライバの運転特性を再現することが目的でもあるので、この最終的に平均化した一本の  $d$ - $\theta$  軌跡をドライバ旋回行動モデルとし、これを用いて 2 章で示した導出手法で目標走行軌跡を求める．

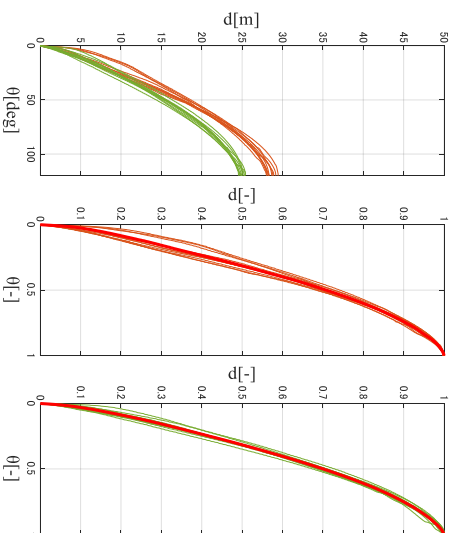


(a)コース 1 での各旋回パターン  $d$ - $\theta$  軌跡 (b)コース 2 での各旋回パターン  $d$ - $\theta$  軌跡

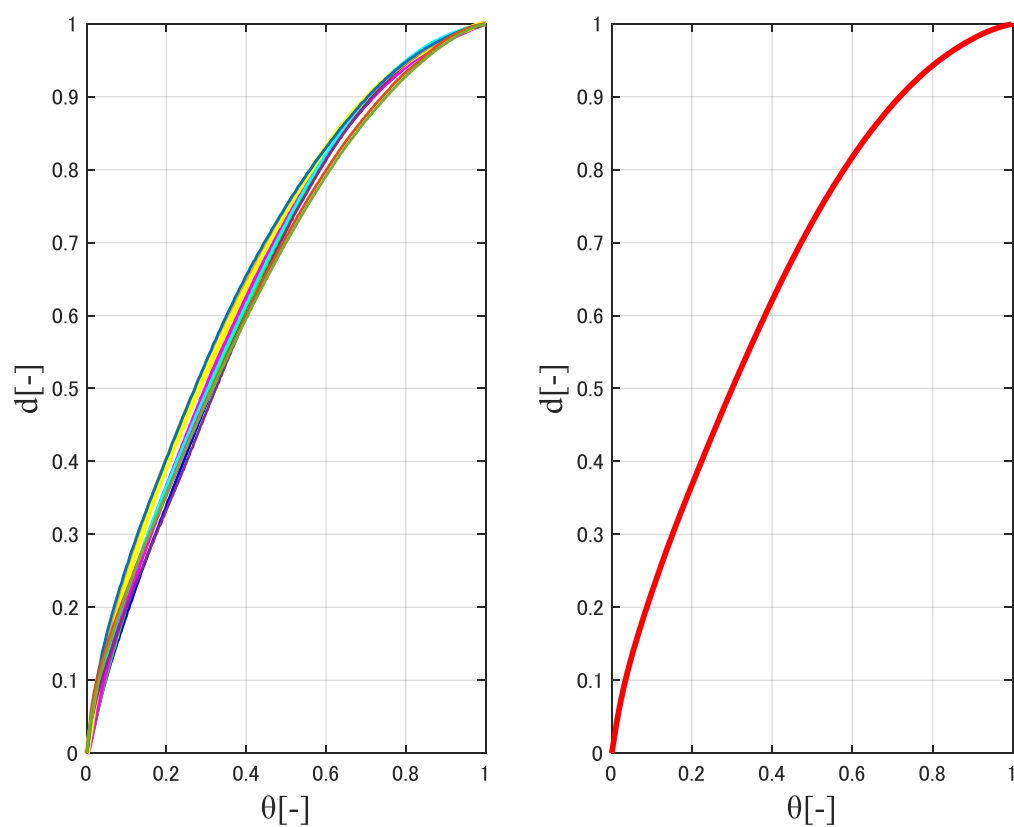
Fig.4.16 各旋回パターンでの  $d$ - $\theta$  軌跡とその正規化軌跡による走行結果表示



(a) コース 3 での各旋回パターン  $d$ - $\theta$  軌跡 (b) コース 4 での各旋回パターン  $d$ - $\theta$  軌跡  
Fig.4.17 各旋回パターンでの  $d$ - $\theta$  軌跡とその正規化軌跡による走行結果表示



(a) コース 5 での各旋回パターン  $d$ - $\theta$  軌跡  
Fig.4.18 各旋回パターンでの  $d$ - $\theta$  軌跡とその正規化軌跡による走行結果表示



(a) 全回転パターンでの正規化  $d$ - $\theta$  軌跡

(b) ドライバ旋回行動モデル

Fig.4.19 正規化  $d$ - $\theta$  軌跡とその平均化した軌跡であるドライバ旋回行動モデル構築結果

## 4.3 ドライバ旋回行動モデルの旋回軌道誤差評価

### 4.3.1 モデルの有効性検証

これまで、三名のドライバの走行データから旋回パターンごとに 10 本の走行軌跡抽出し、各処理を行い最終的に平均化した一本の  $d-\theta$  軌跡としてドライバの運転特性を表現したドライバ旋回行動モデルを導出した。このモデルから二章で述べた手法で各旋回パターンに適応させた目標走行軌跡を導出し、その旋回軌道と車両走行軌跡との旋回軌道誤差を算出し評価することで、本研究の目的である複数のドライバを対象とし、任意形状の交差点におけるドライバの旋回行動特性を単一モデルで表現できるかどうかを検証していく。この際、目標走行軌跡の比較対象とする車両走行軌跡データには、4.2 節で述べた各旋回パターン 10 本の走行軌跡データの中から、モデルに使用した平均値データと比較して旋回区間において最も誤差の少なかった走行データ一本をそれぞれ採用するものとした。具体的な評価方法を説明する。まず、旋回区間にて、目標走行軌跡の描く軌道と車両走行軌跡の進行方向に対して横方向の軌道誤差を逐次算出していく、その軌道誤差の最大値を求める形でモデルの評価を行う。このような方法で各旋回パターンについて軌道誤差の最大値を算出した結果の一覧を表 4.5 に示した。さらに、図 4.20 から図 4.24 にて、全旋回パターンにおける軌道誤差の最大値の算出結果を対象の交差点での軌跡を上から見た図で示した。図 4.20 では交差角 60 度、図 4.21 では交差角 80 度、図 4.22 では交差角 90 度、図 4.23 では交差角 100 度、図 4.24 では交差角 120 度の交差点旋回における比較を示している。それぞれ縦軸は X 座標[m]を示し、横軸は Y 座標[m]を示している。図中の赤線がドライバ旋回行動モデルの描く目標走行軌跡の生成軌道であり、緑線が比較対象とした実際の車両走行軌跡である。青線が走行データ収集実験から抽出した各旋回パターン 10 本の車両走行軌跡である。そして水色の線が、軌道誤差が最大値をとる点での走行軌道に対して引いた垂線である。また、この垂線について評価対象とした旋回パターンごとに番号をつけて示している。図 4.20 から図 4.24 を見てもわかるように、全ての旋回パターンについて任意の交差点形状に適応した目標走行軌跡の導出が可能であることは確認できた。ここから、実際にモデルの評価を行っていく。まずは、表 4.5 の旋回行動モデルの描く目標走行軌跡と対象の車両走行軌跡との走行軌道誤差の算出結果をもとに本モデルを評価していく。パターン①からパターン⑩の多くの旋回パターンにおいて、軌道誤差の最大値は 0.5m 以下という結果になった。ただ、旋回パターン④や⑤、⑧など一部の旋回パターンにおいて軌道誤差が 0.6m 程度となり他の旋回パターンに対して比較的大きな軌道誤差が発生していることが分かる。一部旋回パターンにてこのような軌道誤差が生まれる原因について図 4.19 などを参考に考えると、旋回パターン⑤や⑧の  $d-\theta$  軌跡が内側に位置していることから、他の旋回パターンと比較して車体角が変化するつまりステアリングを操作するタイミングが早い傾向があることが分かる。



その一方で旋回パターン④ステアリング操作のタイミングやスピートが遅く、大回りで旋回走行を行う特性を持つといった傾向が反映されていると考えられる。そうした中で、この走行軌道誤差の最大値について全旋回パターンで平均した値は 0.4m 程度となっている。また、表 4.6 に、各旋回パターンについて旋回開始から終了まで算出した軌道誤差の平均を示している。これより誤差平均は 0.2m 程度となっており、本モデルでは安定的にドライバの走行に類似した旋回が可能であるといえる。ここで、表 4.1 から表 4.4 の走行軌道の横方向の幅の最大値算出結果を参考にすると、本モデルに用いた運転のばらつきは平均して 1.4m 程度、ドライバ個人での運転のばらつきは平均して 1.1m 程度となっており、旋回軌道誤差の最大値は本モデルに用いた走行データ幅の三分の一以下、ドライバ個別でも運転のばらつきの半分以下となっており、人間が運転した際の車両走行軌跡に類似した旋回が実現可能であることが確認できた。

Table 4.5 各旋回パターンでの旋回軌道誤差の最大値

		60deg		80deg		90 deg		100 deg		120 deg	Lane average	Total average	SD
1st lane	①	0.314	③	0.365	⑤	0.673	⑦	0.093	⑨	0.461	0.38	0.42	0.17
2nd lane	②	0.277	④	0.617	⑥	0.400	⑧	0.595	⑩	0.402	0.46		

Table 4.6 各旋回パターンでの旋回軌道誤差平均値

		60deg		80deg		90 deg		100 deg		120 deg	Lane average	Total average	SD
1st lane	①	0.162	③	0.192	⑤	0.372	⑦	0.068	⑨	0.248	0.21	0.22	0.08
2nd lane	②	0.161	④	0.327	⑥	0.222	⑧	0.293	⑩	0.194	0.24		

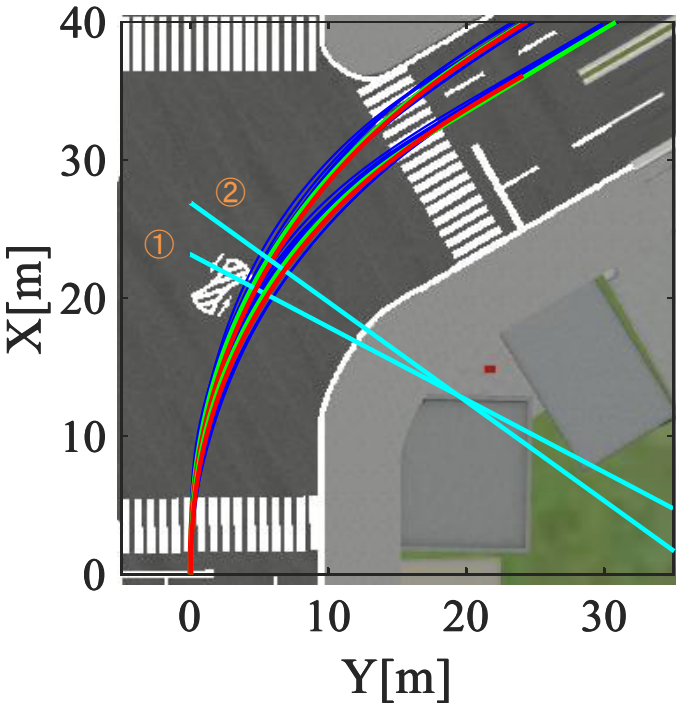


Fig.4.20 走行コース 1 での旋回軌道誤差比較

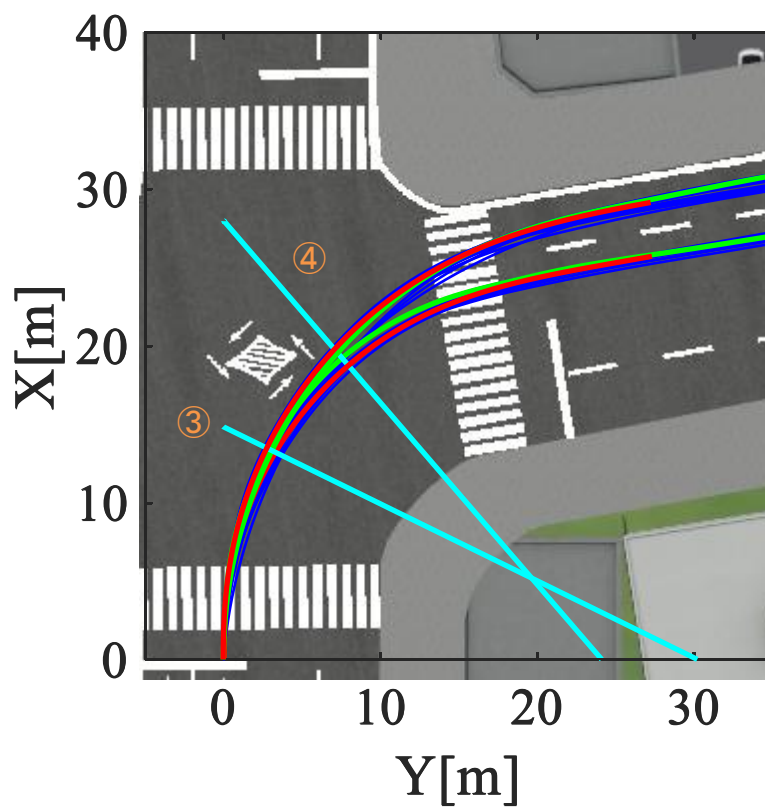


Fig.4.21 走行コース 2 での旋回軌道誤差評価

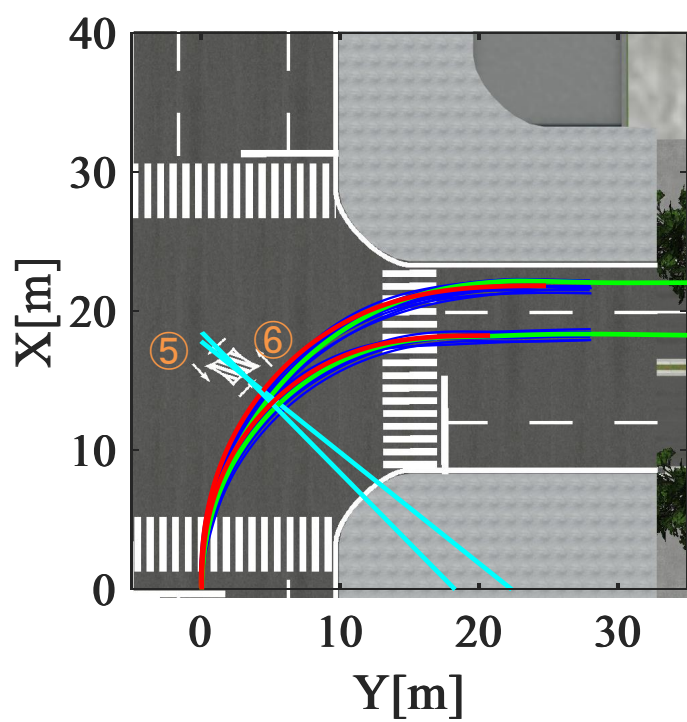


Fig.4.22 走行コース 3 での旋回軌道誤差評価

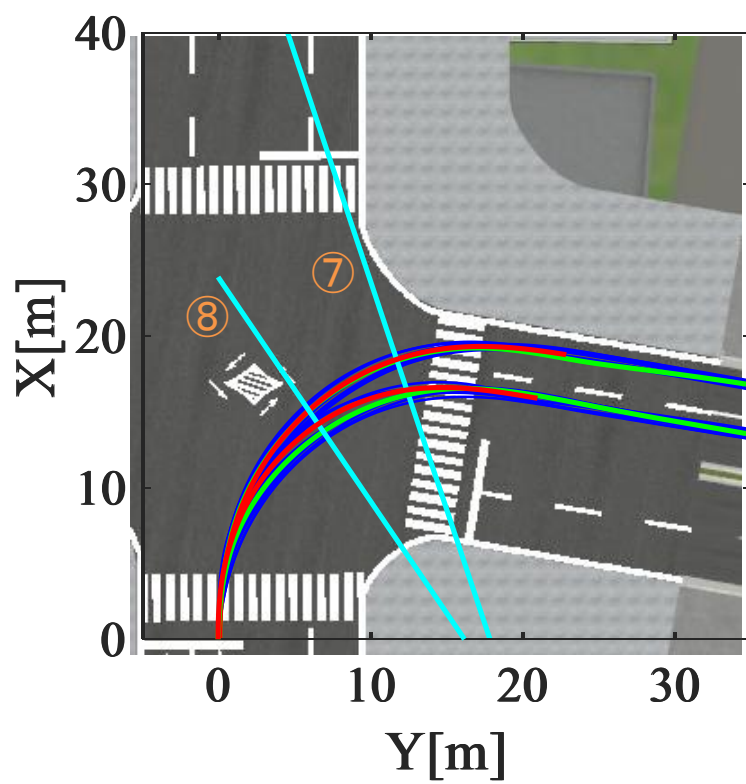


Fig.4.23 走行コース 4 での巡回軌道誤差評価

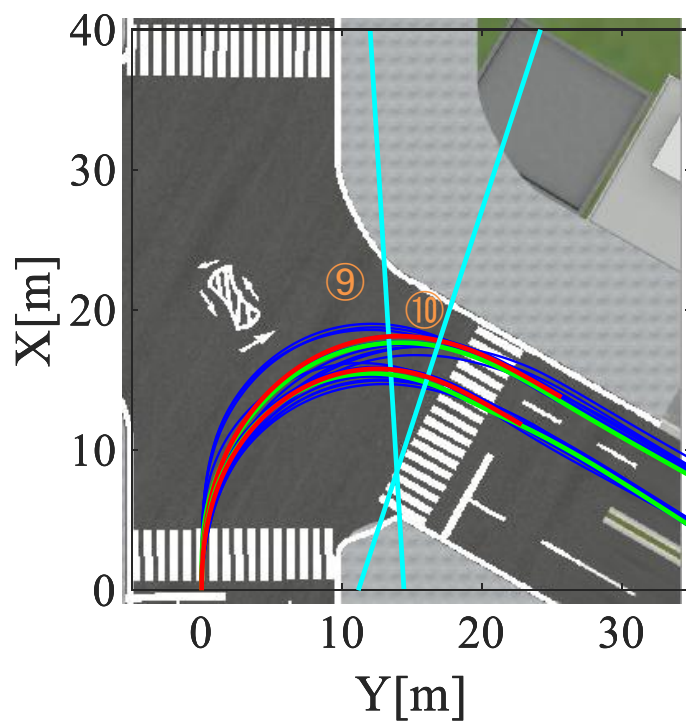


Fig.4.24 走行コース 5 での巡回軌道誤差評価

#### 4.3.2 追加二名のドライバ走行データとの旋回軌道比較

前述した結果より，事前に行った走行データ収集実験にて収集した三名のドライバの車両走行軌跡を用いて，ドライバ旋回行動モデルを構築し，モデルによって導出される目標走行軌跡と対象の車両走行軌跡データとの軌道誤差比較を行った結果，軌道誤差の最大値は人間の運転のばらつきの範囲内に収まっており，人間が運転した際の車両走行軌跡に類似した旋回が実現可能であることが確認できた．しかし，本研究では，複数名ドライバーの走行データを対象とし，任意形状の交差点におけるドライバの旋回行動特性を単一モデルで高精度に表現できるかどうかを検証することが目的であった．よって，前節での検証に加えて，さらに汎用性についても確認する必要がある．このようなことから，追加実験を行った．本節では，モデル構築に用いていないドライバ走行データを新たに収集し，その車両走行軌跡データと 4.2 節で構築したモデルとの軌道誤差比較を行うことで，本モデルの評価を行っていく．まず，追加で収集するドライバ走行データについて説明する．実験環境は基本的には 3 章で前述したものと同様の環境を使用する．追加走行データの収集実験には普段から自動車を一定頻度運転している二名にドライバとして実験協力をお願いした．なお二名のドライバをそれぞれドライバ D，ドライバ E とする．追加実験では，このドライバ D，E の二名を対象とし，それぞれが旋回パターン 1 から 10 の旋回走行を行う．より自然な走行データを取得するために各旋回パターンにつき 5 本程度ずつ走行してもらった．各旋回パターンの走行後に各ドライバーにアンケートを取り，最も上手く自然に旋回できたと感じた走行データを一本選んでもらった．よって各ドライバについて全旋回パターンで 10 本，二名合計 20 本の走行データを用いて，モデルとの軌道誤差比較を行う．比較方法は前節と同様の手法で行い，旋回区間における軌道誤差の最大値を算出し評価していく．まず，二名のドライバの走行データについて別々に軌道誤差評価を行った．ドライバ D についての結果を表 4.7 に示す．ドライバ E についての結果を表 4.8 に示す．このように，二名のドライバの走行データとの軌道誤差比較を別々に行った後に，表 4.7 と表 4.8 との間で各旋回パターンでの軌道誤差の値を比較し，軌道誤差が大きい方の値のみを抽出したものを表 4.9 に示す．また軌道誤差の比較結果について交差点を上から見た際の旋回軌跡についても図 4.25 から図 4.29 に示す．図 4.25 では交差角 60 度，図 4.26 では交差角 80 度，図 4.27 では交差角 90 度，図 4.28 では交差角 100 度，図 4.29 では交差角 120 度の交差点旋回における軌道比較を示している．それぞれ縦軸は X 座標[m]を示し，横軸は Y 座標[m]を示している．図中の赤線がドライバ旋回行動モデルの描く目標走行軌跡の生成軌道であり，緑線が比較対象としたドライバ二名の車両走行軌跡である．また，青線は，比較対象の二本の車両走行軌跡のうちモデルとの軌道誤差最大値が大きくなる走行軌跡に対してその最大値をとる点で走行軌道に対して引いた垂線である．水色線は，比較対象の二本の車両走行軌跡のうち軌道誤差最大値が小さくなる走行軌跡に対してその最大値をとる点で走行軌道に対して引いた

垂線である。表 4.7 に示したように、ドライバ D の車両走行軌跡とモデルの描く目標走行軌跡との軌道誤差最大値を算出した結果、旋回パターン⑦における旋回軌道誤差最大値が 1.074m、旋回パターン⑨における旋回軌道誤差最大値が 1.257m となっており比較的大きな数値となった。また、ドライバ E の車両走行軌跡とも同様に旋回軌道誤差最大値を算出した結果、旋回パターン⑩における軌道誤差最大値が 1.068m となっている。このことから、交差角度が 100 度や 120 度など大きい旋回が必要な交差点走行では、ドライバごとに旋回特性の差が顕著になることが分かる。しかし、算出した軌道誤差について、全ての旋回パターンの値を平均すると両ドライバの走行データともに、軌道誤差の値が 0.5m 程度となり、前節で調査したドライバごとの運転のばらつきである 1.1m の半分程度の値となっている。さらに表 4.9 に示すように、それぞれのドライバ走行データについて、各旋回パターンでの軌道誤差の値を比較し、軌道誤差が大きい方の値のみを抽出した。その値を全旋回パターンで平均すると 0.772m となっており、軌道誤差が大きくなってしまう場合のみ抽出して評価したとしてもドライバの運転のばらつきの範囲内に収まっていることが分かる。これらのことから、モデル構築に用いなかった別のドライバに対しても、運転した際の車両走行軌跡に類似した旋回が実現可能であることが確認できた。

Table 4.7 各旋回パターンでの旋回軌道誤差の最大値（ドライバ D）

DriverD	60deg		80deg		90 deg		100 deg		120 deg		Lane average	Total average	SD
1st lane	①	0.287	③	0.46	⑤	0.232	⑦	1.074	⑨	1.257	0.66	0.58	0.38
2nd lane	②	0.134	④	0.14	⑥	0.763	⑧	0.619	⑩	0.841	0.50		

Table 4.8 各旋回パターンでの旋回軌道誤差の最大値（ドライバ E）

DriverE	60deg		80deg		90 deg		100 deg		120 deg		Lane average	Total average	SD
1st lane	①	0.645	③	0.737	⑤	0.565	⑦	0.144	⑨	0.756	0.57	0.58	0.27
2nd lane	②	0.797	④	0.190	⑥	0.559	⑧	0.321	⑩	1.068	0.59		

Table 4.9 各旋回パターンでの旋回軌道誤差の最大値（誤差大抽出）

	60deg		80deg		90 deg		100 deg		120 deg		Lane average	Total average	SD
1st lane	①	0.645	③	0.737	⑤	0.565	⑦	1.074	⑨	1.257	0.86	0.77	0.29
2nd lane	②	0.797	④	0.190	⑥	0.763	⑧	0.619	⑩	1.068	0.69		

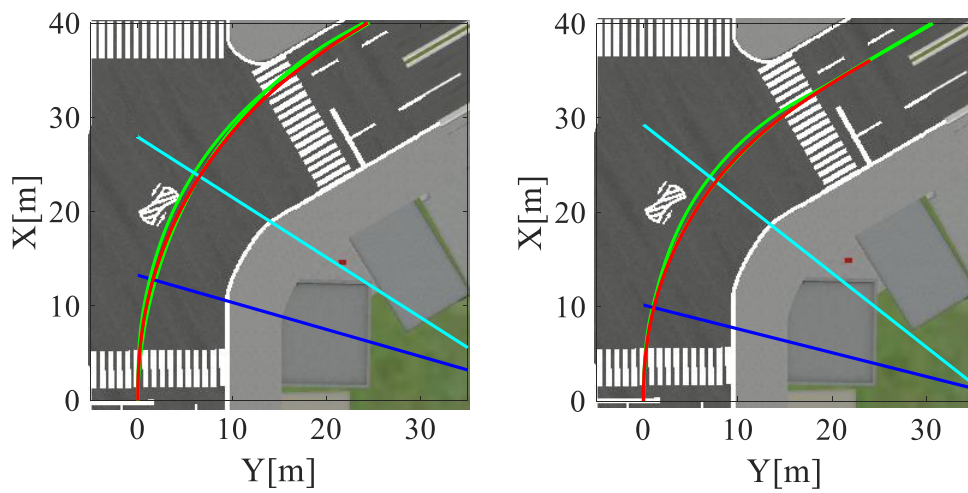


Fig.4.25 旋回パターン 1 と 2 での旋回軌道誤差評価

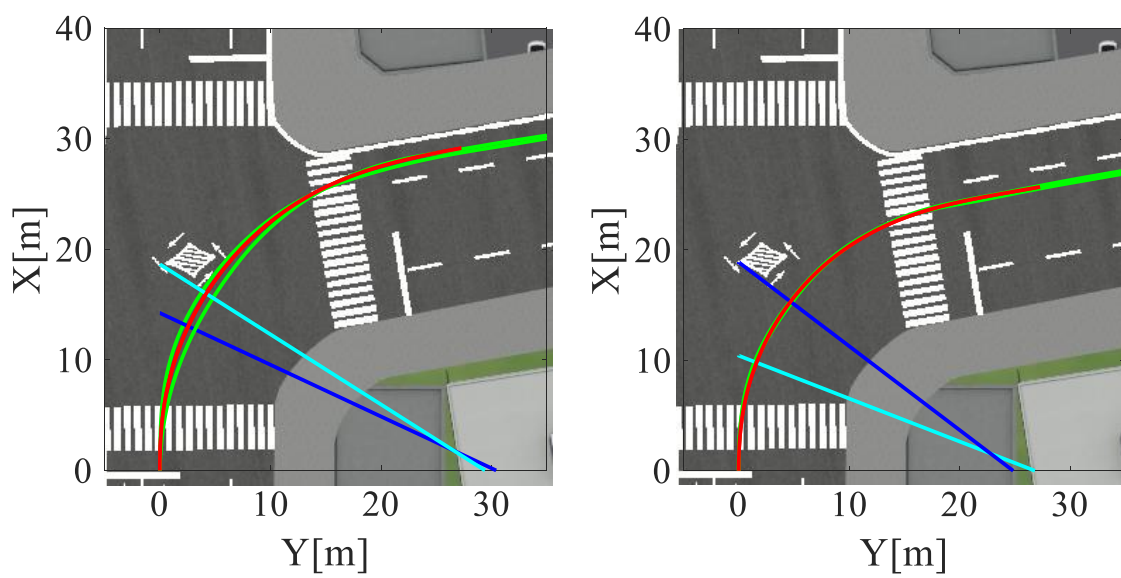


Fig.4.26 旋回パターン 3 と 4 での旋回軌道誤差評価



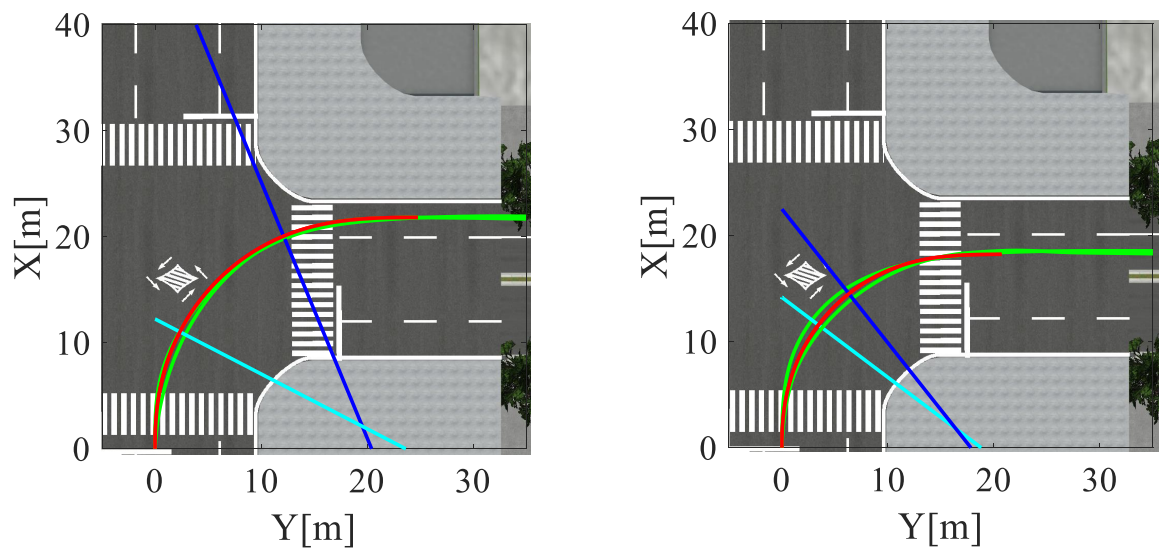


Fig.4.27 旋回パターン 5 と 6 での旋回軌道誤差評価

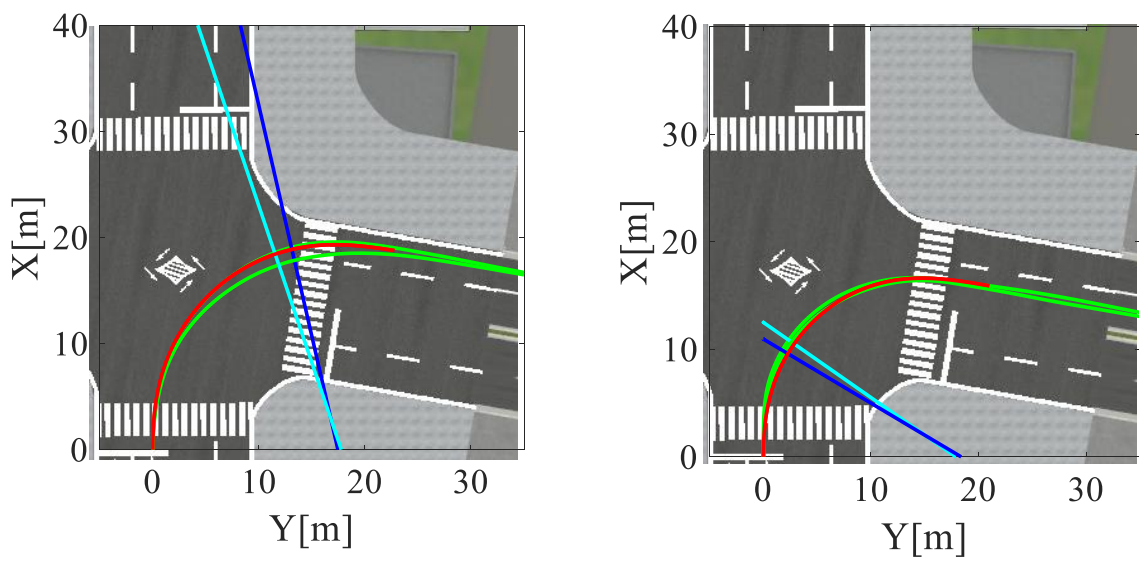


Fig.4.28 旋回パターン 7 と 8 での旋回軌道誤差評価



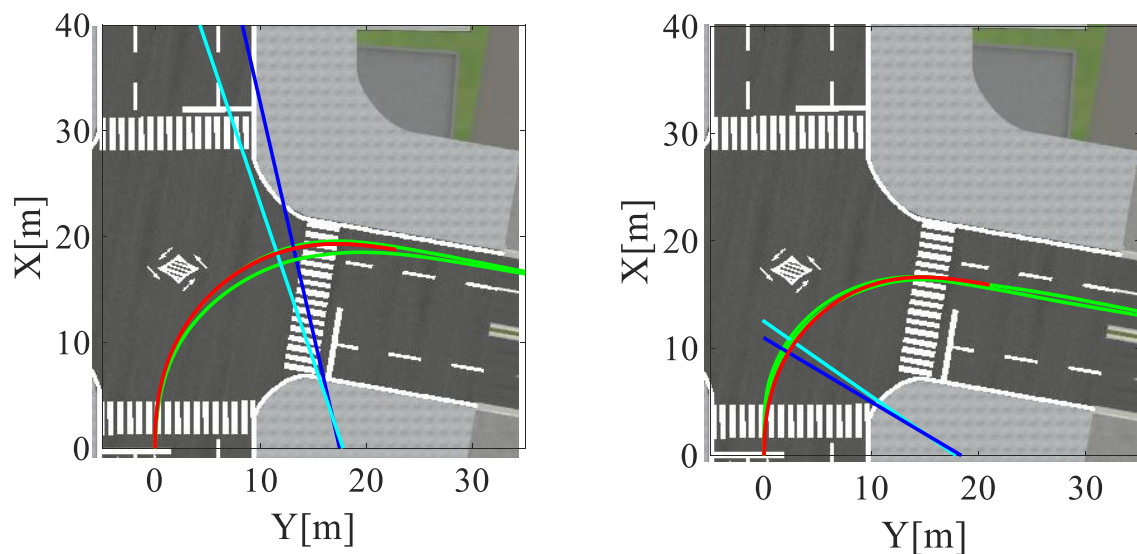


Fig.4.29 旋回パターン 9 と 10 での旋回軌道誤差評価

#### 4.3.3 ドライバ個別モデルの作成と評価

これまで、三名分の走行データを用いて複数のドライバを対象とし、任意形状の交差点におけるドライバの旋回行動特性を単一モデルで表現できるかどうか評価を行ってきた。しかし今節では補足として、一名分の走行データのみをモデル構築に用いて、評価を行うことで、個人の走行特性がどのような形で反映されているのかを調査した。本研究で扱ってきたドライバ旋回行動モデルでは三名それぞれのドライバについて、走行回数は各旋回パターン 10 本ずつ走行し、計 100 回分の走行データを収集した。今節ではこれらの走行データからドライバごとの各 100 本の走行データをそのまま用いてモデル構築を行う。つまり、ドライバー一名分の走行データ 100 本を用いて、そのドライバの運転特性を反映させた単一のドライバ旋回行動モデルを構築する。それを三名分別々で行うので、計三種類のドライバ旋回行動モデルを構築し、評価を行っていく。このように、今節では使用する車両走行軌跡データを対象ドライバー一名分のみに変更しているが、モデルの構築手法や目標走行軌跡の導出方法、モデルの評価方法については本研究で行ってきたものと同様の方法で行う。こうして、ドライバごとにモデル構築を行い、各旋回パターンについて軌道誤差の最大値を算出した結果の一覧を表 4.11 から表 4.13 に示した。さらに、図 4.30 から図 4.34 にて、全旋回パターンにおける軌道誤差の最大値の算出結果を対象の交差点を上から見た軌跡を、例としてドライバ A の走行データを対象とした場合のみで示した。図 4.30 では交差角 60 度、図 4.31 では交差角 80 度、図 4.32 では交差角 90 度、図 4.33 では交差角 100 度、図 4.34 では交差角 120 度の交差点旋回における比較を示している。それぞれ縦軸は X 座標[m]を示し、横軸は

Y 座標[m]を示している。図中の赤線がドライバ旋回行動モデルの描く目標走行軌跡の生成軌道であり、緑線が比較対象とした実際の車両走行軌跡である。そして水色の線が、軌道誤差が最大値をとる点での走行軌道の進行方向に対して引いた垂線である。また、この垂線について評価対象とした旋回パターンごとに番号をつけて示している。ここから、表 4.11 から表 4.13 の旋回行動モデルの描く目標走行軌跡と対象の車両走行軌跡との走行軌道誤差最大値の算出結果をもとに各モデルを評価していく。表 4.11 のドライバ A の結果については、ほぼすべての旋回パターンにおいて軌道誤差の最大値は 0.5m 以下となっており、精度高く旋回特性を再現できているといえる。次に表 4.12 のドライバ B の結果について、旋回パターン①では 0.8m、パターン⑨では 1.2m と比較的大きな軌道誤差を取る結果となった。最後に表 4.13 のドライバ C の結果について、旋回パターン⑨では 1.6m と大きな軌道誤差を取る結果となった。このようにパターン⑨など交差角が 120 度の交差点を含むコースを走行する旋回パターンにて軌道誤差大きくなる傾向が見られた。つまり、他の旋回パターンと比較して走行特性の異なる運転をする場合が多いことが分かる。やはり、交差角の大きな交差点を旋回する場合、旋回軌道は人それぞれ異なる場合があり再現の難易度が上がるが、同じドライバであっても走行データ幅にばらつきはありその範囲内であれば旋回の再現が実現できていると考える。その中で、この走行軌道誤差の最大値について全旋回パターンで平均した値はドライバ A で 0.3m、ドライバ B で 0 約.5m、ドライバ C でも約 0.5m となっている。前述したように、各ドライバ個人での走行データ幅は平均して約 1.1m となっており、全旋回パターンでみると旋回軌道誤差の最大値はドライバ個別でみても運転のばらつきの半分程度となっており、人間が運転した際の車両走行軌跡に類似した旋回が実現可能であることが確認できた。

Table 4.11 ドライバ A について交差点ごと軌道誤差の最大値

例	60deg	80deg	90 deg	100 deg	120 deg	Lane average	Total average	SD
1st lane	① 0.325	③ 0.277	⑤ 0.186	⑦ 0.349	⑨ 0.194	0.27	0.30	0.16
2nd lane	② 0.266	④ 0.657	⑥ 0.096	⑧ 0.162	⑩ 0.488	0.33		

Table 4.12 ドライバ B について交差点ごと軌道誤差の最大値

	60deg	80deg	90 deg	100 deg	120 deg	Lane average	Total average	SD
1st lane	① 0.840	③ 0.208	⑤ 0.537	⑦ 0.511	⑨ 1.263	0.67	0.53	0.31
2nd lane	② 0.355	④ 0.185	⑥ 0.525	⑧ 0.629	⑩ 0.284	0.40		

Table 4.13 ドライバ C について交差点ごと軌道誤差の最大値

	60deg	80deg	90 deg	100 deg	120 deg	Lane average	Total average	SD
1st lane	① 0.264	③ 0.457	⑤ 0.606	⑦ 0.131	⑨ 1.665	0.62	0.54	0.40
2nd lane	② 0.401	④ 0.320	⑥ 0.592	⑧ 0.478	⑩ 0.505	0.46		

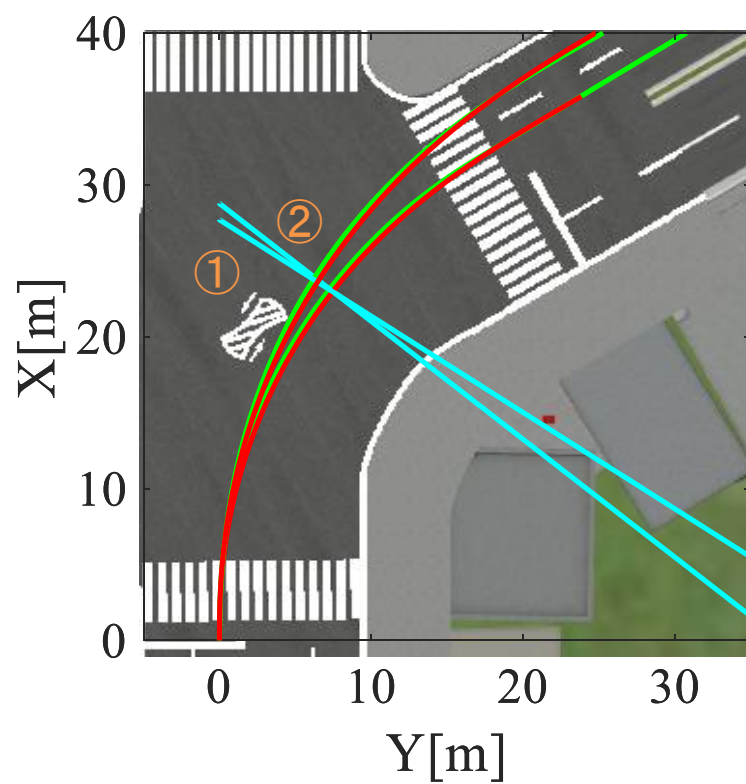


Fig.4.30 走行コース 1 での旋回軌道誤差評価

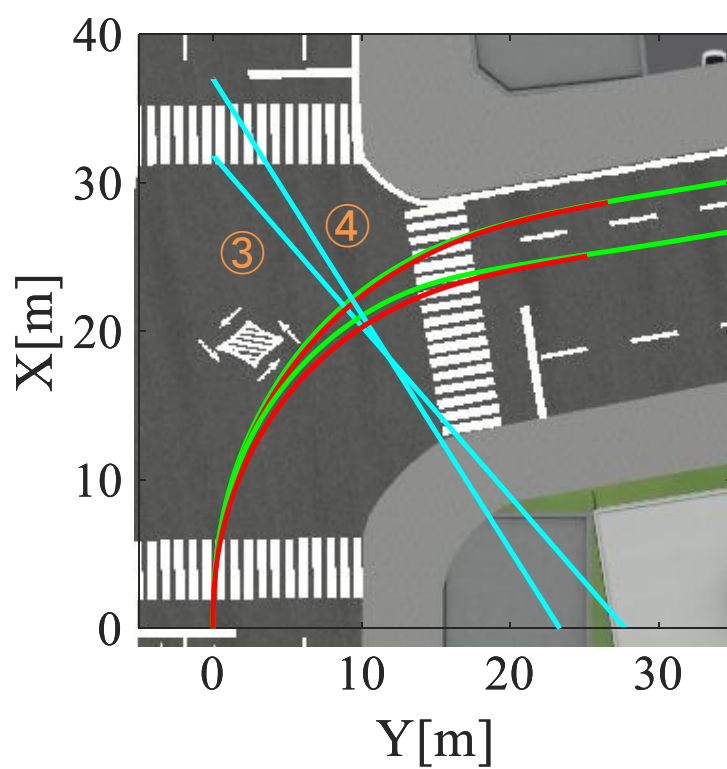


Fig.4.31 走行コース 2 での旋回軌道誤差評価

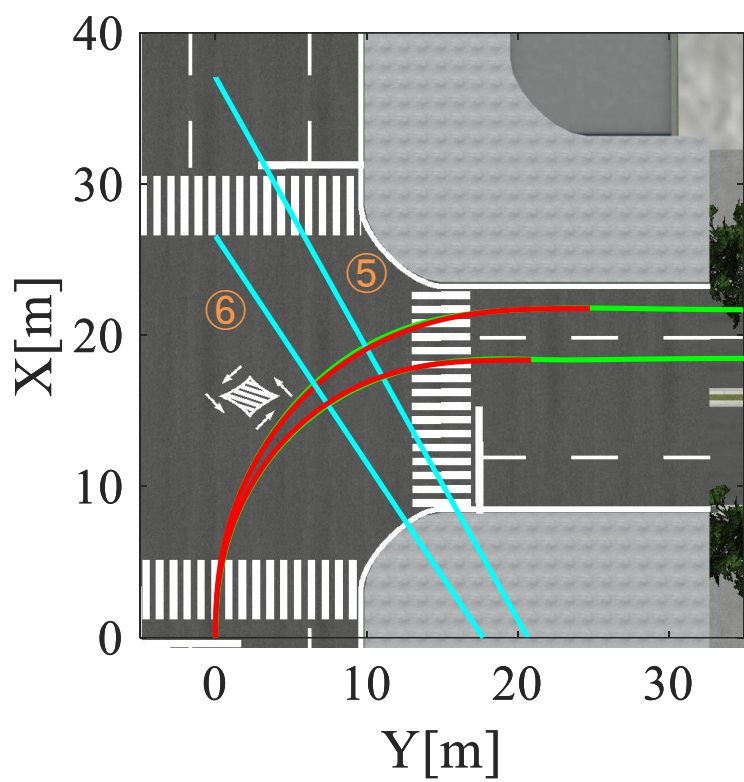


Fig.4.32 走行コース 3 での巡回軌道誤差評価

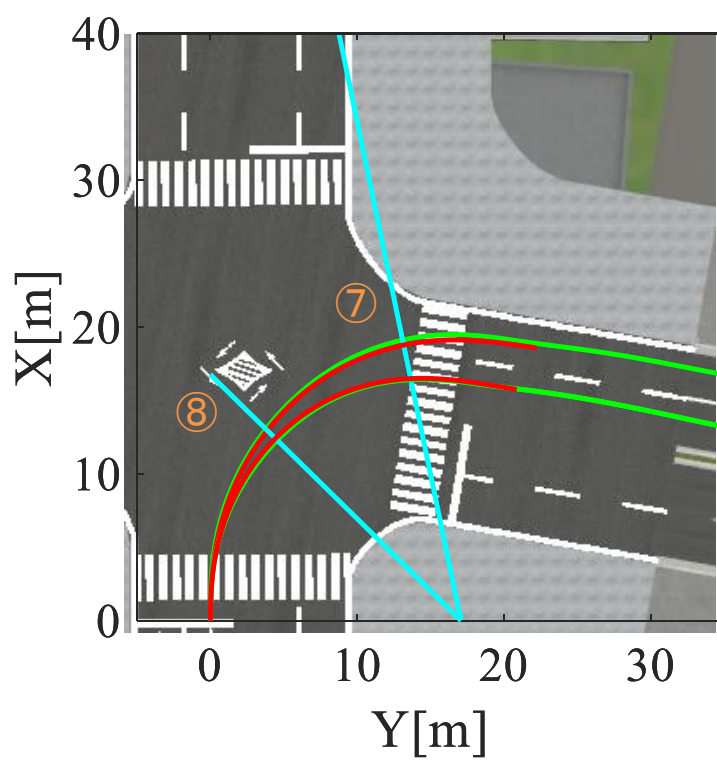


Fig.4.33 走行コース 4 での巡回軌道誤差評価

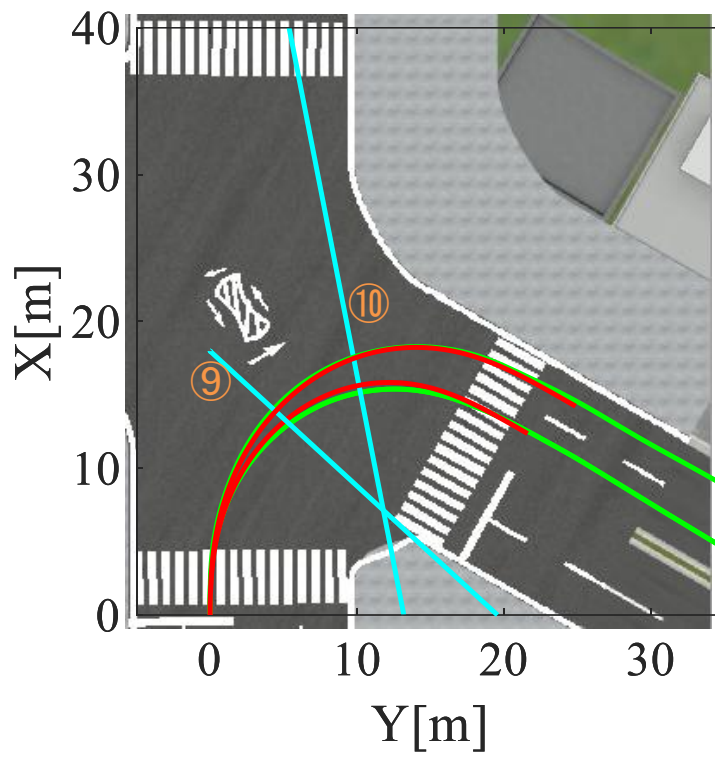


Fig.4.34 走行コース 5 での旋回軌道誤差評価

# 第 5 章

## 結論

### 5.1 本研究のまとめ

本研究では、複数のドライバを対象とし、任意形状の交差点におけるドライバの旋回行動特性を単一モデルで高精度に表現できるかどうかを検証し、提案されてきた本ドライバ旋回行動モデルの有効性を示すことを目的とした。収集した走行データからドライバ旋回行動モデルを構築し、走行データと比較することでモデルの評価検証を行った。人間は交差点で旋回する際に旋回先の車線中央へ進入するよう旋回し、旋回前の進行方向への変位に応じて車体角度を制御しているとの考え方に基づいた走行軌跡ベースのモデル化を行った。まず、ドライビングシミュレータを用いて三名のドライバを対象に運転情報収集実験を行った。交差角が異なる五つの交差点を、旋回先の第一と第二車線にそれぞれ右折走行する全 10 パターンを三名、合計 300 本の走行データを収集した。その走行データから無作為に各旋回パターン 10 本、合計 100 本の走行データを抽出した。旋回開始点は交差点進入時の停止線、旋回終了点は車体が旋回後車線に対し平行になる点とする。また、停止線からの垂直変位距離  $d$  [m]、旋回前進行方向と現在の車両進行方向のなす角を車体角  $\theta$  [deg]とし、変位距離と車体角との関係を表す  $d$ - $\theta$  軌跡形式でモデル化を行った。具体的には、各旋回パターンの走行データについて、 $d$ - $\theta$  軌跡を作成し、全旋回パターンの軌跡 10 本を平均化し一本の  $d$ - $\theta$  軌跡をドライバ旋回行動モデルとして導出した。そして、車両走行軌跡とドライバ旋回行動モデルの描く走行軌跡との軌道誤差比較を行った。さらに、モデル構築に用いなかった別の二名のドライバの全 10 パターンの旋回走行について、二名合計 20 本の走行データを収集し、その車両走行軌跡との軌道誤差比較も行った。その結果、全旋回パターンについて算出した軌道誤差の最大値の平均値が 0.5 [m]以下となり、各旋回パターンにおける人間の運転のばらつきとして算出した 1 m から 1.4 [m]の範囲内に収まっており、かつ、その半分程度の値となっていることから人間の運転した車両走行軌跡に類似した旋回が実現されていることを確認し、 $d$ - $\theta$  軌跡に基づくドライバ旋回行動モデルの有効性を示すことができた。



## 5.2 今後の課題

本研究では、走行データの車両走行軌跡を用いてドライバ旋回行動モデルを構築し、モデルから導出した目標走行軌跡の描く旋回軌道と、対象の旋回パターンにおける車両走行軌跡とを比較し、軌道誤差を求めることでモデルの評価を行った。その際、事前に行った走行データ収集実験の結果より各旋回パターンについて算出した人間の走行データのばらつきである 1 m から 1.4 m の範囲内に収まっているかどうか、またその幅に対して小さい誤差で旋回を行うことができかという観点で評価を行った。つまり、モデルの評価が PC 上での走行軌跡同士の比較にとどまっており、実際に人間がどう感じるかといった主観的な評価を行えていない。よって今後の課題として、本研究で行った走行軌道比較による誤差評価に加えて、ドライバ旋回行動モデルによって行われる走行を映像評価など行う形で実際にドライバに体験してもらい、その際に感じる不快感や不安感といった心理的な指標について主観評価などを行うことで検証する必要がある。また、別のドライバの走行データを用いて構築したモデルによって行われる走行をまた別のドライバに体験してもらい、どう感じるかといった評価を行うことでモデルの有効性を検証していく必要がある。また、本研究の交差点旋回パターンは全て交差点における右折走行のみを対象として、走行データの収集からモデル構築し、その評価までを行った。そのため交差点における左折走行については検証を行えていない。よって今後は、本モデルを左折についても応用可能か調査するとともに、さらに多様な旋回パターンにおいて交差点におけるドライバの旋回行動特性を単一モデルで高精度に表現できるかどうか検証を行っていく必要がある。

# 参考文献

- [1] Manana S. Netto, Salim Chaib, and Said Mammar. “Lateral adaptive control for vehicle lane keeping”, IEEE Proceedings of American Control Conference, Vol. 3, pp.2693-2698(2004)
- [2] Ardalan Vahidi, and Azim Eskandarian, “Research advances in intelligent collision avoidance and adaptive cruise control”, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems Vol.4, No.3 pp.143-153(2003)
- [3] Cades, David M. , et al. ”Driver distraction and advanced vehicle assistive systems (ADAS): investigating effects on driver behavior.” Advances in Human Aspects of Transportation: Proc. of the AHFE 2016 Int’l Conf. on Human Factors in Transportation, 2016.
- [4] ”令和 5 年中の交通事故死亡者について”, 政府統計の総合窓口 (2024/1/10 参照)  
[online] [https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&cycle=7&year=20230&month=0&toukei=00130002&tstat=000001032793&result\\_back=1&tclass1val=0&stat\\_infid=000040133400](https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&cycle=7&year=20230&month=0&toukei=00130002&tstat=000001032793&result_back=1&tclass1val=0&stat_infid=000040133400)
- [5] ”Mercedes-Benz DRIVE PILOT further expands U.S. availability through California certification. “, Mercedes-Benz Group official site(2023/12/10)  
[online] <https://group.mercedes-benz.com/innovation/product-innovation/autonomous-driving/drive-pilot-california.html>
- [6] ”The Waymo Driver: now available on Uber in Phoenix”, the official Waymo blog(2023/12/10)  
[online] <https://waymo.com/blog/2023/10/the-waymo-driver-now-available-on-uber-in-phoenix/>
- [7] 吉本達也, 深尾隆則, ”ドライバ特性を考慮したアダプティブクルーズコントロール”, 日本機械学会論文集, Vol.84, No.868, pp.1- 11 (2018)
- [8] 貴答竣亮, 荒川俊也, “自動運転使用時におけるドライバ行動の観察と考察”, 産業応用工学論文誌, Vol. 8, No. 2, pp. 222-228 (2020)
- [9] 村上貴哉, 橘川雄樹, 竹内栄二郎, 二宮芳樹, 目黒淳一, “自動運転に適用する三次元点群の評価に関する研究”, 日本機械学会論文集, Vol.86, No.892, pp.1-17 (2020)
- [10] 南部駿太, 増田寛之, 布施陽太郎, 沢井圭, 本吉達郎, 高木昇, “自動運転に対して上院の抱く不安感と乗員の運転特性の関連性”, 日本知能情報ファジィ学会誌, Vol.35, No.3, pp.720-730 (2023)
- [11] 小松崎諒子, 武田陸, 谷口守, “自動運転化による社内活動の変容とその要因分析”, 第 40 回交通工学研究発表会論文集, No.89, pp.573-pp.578 (2020)
- [12] 古澤悠吾, 溝上章志, 森俊勝, 八戸龍馬, 完全自動運転カーシェアサービスの導入可能性に関するシミュレーション分析, 土木学会論文集 D3, Vol.76, No. 2, pp.168-179 (2020)
- [13] 平松真知子, 張化先, 根本英明, 伊藤勇希, 山崎勝, 寸田剛司, “自動走行における運転スタイル個人適合手法の提案”, 自動車技術会論文集 Vol.49, No.4, pp.818-824 (2021)
- [14] 佐々木勇介, 山口拓真, 川島明彦, 稲垣伸吉, 鈴木達也, “走行/駐車の間経過マルコフモデルと動的計画法に基づく車の使用予測”, 計測自動制御学会論文集 52(11), pp.605-613 (2016)
- [15] 西崎浩平, 毛利宏, “先行者に追従する自動運転車両の目標軌跡生成と制御手法の提案”, 日本機械学会論文集, Vol.83, No.852, pp.1-11 (2017)
- [16] 高久拓海, 船崎友稀奈, 瀬戸徳, 中村聡史, 山中祥太, ”ドライビングシミュレータにおけるカーブ走行時のカーブ半径と道路幅が運転に及ぼす影響の調査”, 情報処理学会研究報告, Vol.195, No.17, pp.1-8 (2021)
- [17] 後藤明之, 福重孝志, 木村健, “市街地自動運転のための動的計画法を用いたリアルタ

- イム軌跡計画”，自動車技術会論文集，Vol.52, No.3, pp.639-644 (2021)
- [18] 本田康平，奥田裕之，鈴木達也，“非線形モデル予測制御を用いたレーンチェンジにおける行動決定・経路計画・制御の同時実行”，自動車技術会論文集 Vol.52, No.1, pp.100-105 (2021)
- [19] 辻悠介，菅本周作，奥田裕之，山口拓真，鈴木達也，“確率的な時変パラメータをもつ制御器モデルによる車線維持行動のモデル化”，計測自動制御学会論文集，Vol.58, No.12, pp.581-590 (2022)
- [20] 川勝俊輝，毛利宏，“交差点での右左折における目標操舵角生成手法” 日本機械学会論文集，Vol.83, No.854, pp.1-11(2017)
- [21] 瀧山武，藤田純一，“任意の目標地点を通る車両旋回制御のためのクロソイド曲線を用いた旋回軌道実時間生成”，自動車技術会論文集，Vol.51, No.6, pp.1012-1018 (2020)
- [22] 早川聡一郎，池浦良淳，堀木亮祐，“ハイブリッドシステムに基づくドライバ運転行動モデルを用いた自律走行車の制御システム設計”，平成25年電気学会産業応用部門大会講演会講演概要集2-S8-5，“II-37”-“II-40” (2012)
- [23] 内田龍貴：“ハイブリッドシステムに基づくドライバ旋回操作モデル同定と有効性検証”，三重大学大学院工学研究科機械工学専攻平成 24 年度修士学位論文
- [24] 柴山森太郎：“クロソイド曲線に基づくドライバ旋回操作モデル同定”，三重大学大学院工学研究科機械工学専攻平成 26 年度修士学位論文
- [25] 鈴木崇恭：“外部環境情報に基づくドライバ旋回行動モデルの構築と有効性検証”，三重大学大学院工学研究科機械工学専攻平成 27 年度修士学位論文
- [26] 小嶋友輔：“フィードバックモデル構造に基づいたドライバ旋回操作モデルの構築と有効性検証”，三重大学大学院工学研究科機械工学専攻平成28年度修士学位論文
- [27] 水谷謙太：“ハイブリッドシステム表現に基づいたドライバ旋回行動モデルの交差点形状対応の検討”，三重大学大学院工学研究科機械工学専攻平成29年度修士学位論文
- [28] 西川貴大：“交差点に依存しないドライバの交差点右折行動モデル”  
三重大学大学院工学研究科機械工学専攻令和 1 年度修士学位論文

# 謝辞

本研究を進めるにあたり，三重大学大学院工学研究科機械工学専攻 池浦良淳教授には研究に関する有益なご助言を頂き，深く感謝致します。厚く御礼申し上げます。

また，大変お忙しい中，本論文を査読して頂くと共に，多数のご教示，ご助言を賜りました三重大学大学院工学研究科機械工学専攻 矢野賢一教授に厚く御礼申し上げます。

また，三重大学大学院工学研究科機械工学専攻 早川聡一郎准教授には終始多大なる御指導，御鞭撻を親身になって行って頂き，深く感謝致し，厚く御礼申し上げます。

また，藤原明子秘書には事務手続きを始め，研究しやすい環境をおつくりくださり，厚く御礼申し上げます。

本研究にあたり，お忙しい中，実験に協力していただいた，棚瀬直浩氏，菱川直輝氏，西村晟央氏，三岩功季氏に深く感謝しております。厚く御礼申し上げます。

また，研究室生活を忘れる事の出来ない充実したものにして頂いた同期の谷口泰誠氏，内田雄大氏，鈴木理央氏，森井省吾氏には心より感謝の意を表します。

また，研究室での生活を楽しく豊かにして頂いた，修士 1 年生と 4 年生の皆様に感謝し，今後のご活躍を期待しております。

最後に，大学院在籍中，惜しめない援助を送ってくださった家族のお陰で充実した素晴らしい勉強・研究生活を送ることができました。感謝の気持ちを述べることで謝辞の最後とさせていただきます。